

## PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 2001-255306

(43)Date of publication of application : 21.09.2001

(51)Int.Cl.

G01N 29/00  
H01S 3/00

(21)Application number : 2000-065667

(71)Applicant : NATL INST OF ADVANCED INDUSTRIAL  
SCIENCE & TECHNOLOGY METI  
TOSHIBA CORP

(22)Date of filing : 09.03.2000

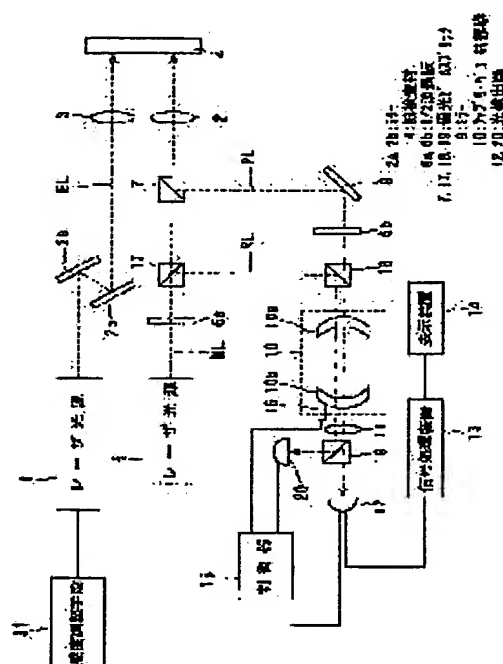
(72)Inventor : OCHIAI MAKOTO  
MUKAI SHIGEHICO  
SANO YUJI  
KANEMOTO SHIGERU  
NAKANO HIDETOSHI

## (54) LASER ULTRASONIC APPARATUS

## (57)Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To provide a laser ultrasonic apparatus capable of detecting a weak luminous intensity signal with high sensitivity and capable of observing minute frequency shift contained therein in magnitude of a noise level or more.

SOLUTION: The laser ultrasonic apparatus is equipped with a resonator length control means 15 for allowing the output signal level of a light detection means 12 or a part of measuring laser beam to be incident on a Fabry-Perot resonator 10 through a light path avoiding a material to be inspected and controlling the resonance length of the Fabry-Perot resonator 10 from the output signal level of a separate light detection means 20 for detecting the intensity of the output light of the resonator, and a sensitivity adjusting means 31 for adjusting the sensitivity of the light detection means 12 on the basis of predetermined time delay and predetermined time width in the modulation timing of a first laser beam source 1.



## LEGAL STATUS

[Date of request for examination]

[Date of sending the examiner's decision of rejection]

[Kind of final disposal of application other than the  
examiner's decision of rejection or application converted  
registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number]

[Date of registration]

[Number of appeal against examiner's decision of  
rejection][Date of requesting appeal against examiner's decision of  
rejection]

[Date of extinction of right]

Copyright (C); 1998,2003 Japan Patent Office

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開2001-255306

(P2001-255306A)

(43) 公開日 平成13年9月21日 (2001.9.21)

(51) Int.Cl.<sup>7</sup>

G 0 1 N 29/00

H 0 1 S 3/00

識別記号

5 0 1

F I

G 0 1 N 29/00

H 0 1 S 3/00

テ-マコ-ト(参考)

5 0 1

2 G 0 4 7

F 5 F 0 7 2

審査請求 未請求 請求項の数16 O L (全 36 頁)

(21) 出願番号 特願2000-65667(P2000-65667)

(22) 出願日 平成12年3月9日(2000.3.9)

(71) 出願人 301000011

経済産業省産業技術総合研究所長

東京都千代田区霞が関1丁目3番1号

(74) 上記1名の復代理人 100078765

弁理士 波多野 久 (外1名)

(71) 出願人 000003078

株式会社東芝

東京都港区芝浦一丁目1番1号

(74) 上記1名の代理人 100078765

弁理士 波多野 久 (外1名)

(72) 発明者 落合 誠

神奈川県横浜市磯子区新杉田町8番地 株式会社東芝横浜事業所内

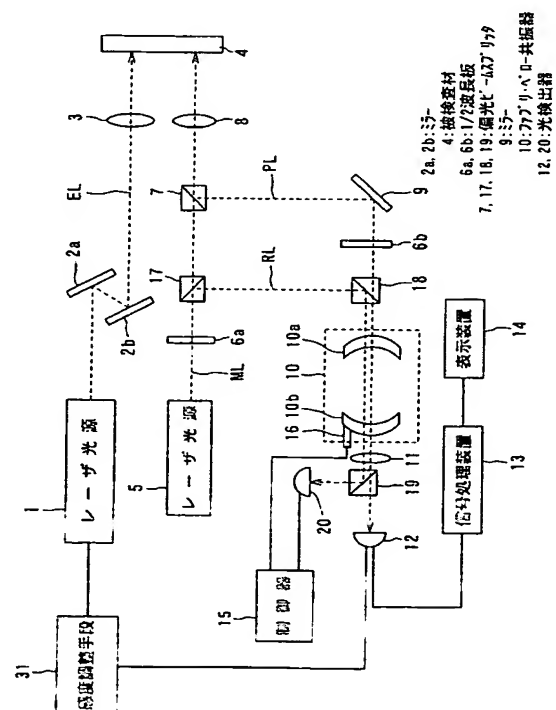
最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 レーザ超音波装置

(57) 【要約】

【課題】微弱な光強度信号を感度良く検出することができ、かつその中に含まれる微小な周波数シフトをノイズレベル以上の大きさで観測できるレーザ超音波装置を提供する。

【解決手段】光検出手段12の出力信号レベルあるいは計測用レーザビームの一部を被検査材4を回避した光路でファブリ・ペロー共振器10に入射し、その出力光の強度を検出した別の光検出手段20の出力信号レベルからファブリ・ペロー共振器10の共振長を制御するための共振器長制御手段15と、第1のレーザ光源1の変調タイミングを基準とし、所定の時間遅れと所定の時間幅で光検出手段12の感度を調整する感度調整手段31とを備えた。



## 【特許請求の範囲】

【請求項 1】 被検査材に超音波を発生させるために変調された励起用レーザビームを発する第 1 のレーザ光源と、前記被検査材を伝播した超音波を観測するための計測用レーザビームを発する第 2 のレーザ光源と、前記励起用レーザビームを前記被検査材の所定の位置に所定の条件で照射するための第 1 の光学手段と、前記計測用レーザビームを前記被検査材の所定の位置に所定の条件で照射するとともに、前記被検査材からの反射光を導くための第 2 の光学手段と、この第 2 の光学手段によって導かれた反射光を入射するファブリ・ペロー共振器と、このファブリ・ペロー共振器の出力光の強度を検出する少なくとも 1 個の光検出手段と、この光検出手段の出力信号レベルあるいは前記計測用レーザビームの一部を前記被検査材を回避した光路で前記ファブリ・ペロー共振器に入射し、その出力光の強度を検出した別の光検出手段の出力信号レベルから前記ファブリ・ペロー共振器の共振長を制御するための共振器長制御手段と、前記第 1 のレーザ光源の変調タイミングを基準とし、所定の時間遅れと所定の時間幅で前記光検出手段の感度を調整する感度調整手段とを備えたことを特徴とするレーザ超音波装置。

【請求項 2】 被検査材に超音波を発生させるために変調された励起用レーザビームを発する第 1 のレーザ光源と、前記被検査材を伝播した超音波を観測するための計測用レーザビームを発する第 2 のレーザ光源と、前記励起用レーザビームを前記被検査材の所定の位置に所定の条件で照射するための第 1 の光学手段と、前記計測用レーザビームを前記被検査材の所定の位置に所定の条件で照射するとともに、前記被検査材からの反射光を導くための第 2 の光学手段と、この第 2 の光学手段によって導かれた反射光を入射するファブリ・ペロー共振器と、このファブリ・ペロー共振器の出力光の強度を検出する少なくとも 1 個の光検出手段と、この光検出手段のうち 1 つの出力信号レベルあるいは前記計測用レーザビームの一部を前記被検査材を回避した光路で前記ファブリ・ペロー共振器に入射し、その出力光の強度を検出した別の光検出手段の出力信号レベルから前記ファブリ・ペロー共振器の共振長を制御するための共振器長制御手段と、前記光検出手段の出力信号レベルから前記ファブリ・ペロー共振器への入射光量を調整するとともに、前記第 2 のレーザ光源の発振光の光路上に配置した光量調整手段とを備えたことを特徴とするレーザ超音波装置。

【請求項 3】 被検査材に超音波を発生させるために変調された励起用レーザビームを発する第 1 のレーザ光源と、前記被検査材を伝播した超音波を観測するための計測用レーザビームを発する第 2 のレーザ光源と、前記励起用レーザビームを前記被検査材の所定の位置に所定の条件で照射するための第 1 の光学手段と、前記計測用レーザビームを少なくとも 2 つのレーザビームに分岐する

ための第 1 の光分岐手段と、この第 1 の分岐手段によって分岐された少なくとも 1 つのレーザビームの光周波数を所定量だけシフトするための光変調手段と、前記第 1 の分岐手段で分岐された他方のレーザビームを前記被検査材の所定の位置に所定の条件で照射するとともに、前記被検査材からの反射光を導き、さらに前記光変調手段によって変調されたレーザビームと同一光路に合成するための第 2 の光学手段と、この第 2 の光学手段によって合成された光線を入射するファブリ・ペロー共振器と、このファブリ・ペロー共振器の出力光を前記被検査材からの反射光と前記光変調手段によって変調されたレーザビームに分離する第 2 の光分岐手段と、この第 2 の光分岐手段で分離された各々の光信号強度を検出する少なくとも 2 個の光検出手段と、これらの光検出手段のうち前記光変調手段によって変調されたレーザビームを受光した前記光検出手段の出力信号レベルから前記ファブリ・ペロー共振器の共振長を制御するための共振器長制御手段とを備えたことを特徴とするレーザ超音波装置。

【請求項 4】 被検査材に超音波を発生させるために変調された励起用レーザビームを発する第 1 のレーザ光源と、前記被検査材を伝播した超音波を観測するための計測用レーザビームを発する第 2 のレーザ光源と、前記励起用レーザビームを前記被検査材の所定の位置に所定の条件で照射するための第 1 の光学手段と、前記計測用レーザビームを前記被検査材の所定の位置に所定の条件で照射するとともに、前記被検査材からの反射光を導くための第 2 の光学手段と、この第 2 の光学手段によって導かれた反射光を入射するファブリ・ペロー共振器と、このファブリ・ペロー共振器の出力光の強度を検出する少なくとも 1 個の光検出手段と、この光検出手段のうち 1 つの出力信号レベルあるいは前記計測用レーザビームの一部を前記ファブリ・ペロー共振器に入射し、その出力光の強度を検出した別の光検出手段の出力信号レベルから前記ファブリ・ペロー共振器の共振長を制御するための共振器長制御手段とを備え、この共振器長制御手段は、前記ファブリ・ペロー共振器の 2 枚のミラーの間に挿入され、かつ透過長さを調整可能なレーザビーム透過部材であることを特徴とするレーザ超音波装置。

【請求項 5】 被検査材に超音波を発生させるために変調された励起用レーザビームを発する第 1 のレーザ光源と、前記被検査材を伝播した超音波を観測するための計測用レーザビームを発する第 2 のレーザ光源と、前記励起用レーザビームを前記被検査材の所定の位置に所定の条件で照射するための第 1 の光学手段と、前記計測用レーザビームを前記被検査材の所定の位置に所定の条件で照射するとともに、前記被検査材からの反射光を導くための第 2 の光学手段と、この第 2 の光学手段によって導かれた反射光を入射するファブリ・ペロー共振器と、このファブリ・ペロー共振器の出力光の強度を検出する少なくとも 1 個の光検出手段と、この光検出手段のうち 1

つの出力信号レベルあるいは前記計測用レーザビームの一部を前記被検査材を回避した光路で前記ファブリ・ペロー共振器に入射し、その出力光の強度を検出した別の光検出手段の出力信号レベルから前記ファブリ・ペロー共振器の共振長を制御するための共振器長制御手段とを備え、この共振器制御手段は、前記ファブリ・ペロー共振器を空間的に密閉する密閉手段と、この密閉手段の内部圧力を調整するための圧力調整手段であることを特徴とするレーザ超音波装置。

【請求項 6】 被検査材に超音波を発生させるために変調された励起用レーザビームを発する第 1 のレーザ光源と、前記被検査材を伝播した超音波を観測するための計測用レーザビームを発する第 2 のレーザ光源と、前記励起用レーザビームを前記被検査材の所定の位置に所定の条件で照射するための第 1 の光学手段と、前記計測用レーザビームを前記被検査材の所定の位置に所定の条件で照射するとともに、前記被検査材からの反射光を導くための第 2 の光学手段と、この第 2 の光学手段によって導かれた反射光を入射するファブリ・ペロー共振器と、このファブリ・ペロー共振器の出力光の強度を検出する少なくとも 1 個の光検出手段と、この光検出手段のうち 1 つの出力信号レベルあるいは前記計測用レーザビームの一部を前記被検査材を回避した光路で前記ファブリ・ペロー共振器に入射し、その出力光の強度を検出した別の光検出手段の出力信号レベルから前記ファブリ・ペロー共振器の共振長を制御するための共振器長制御手段とを備え、前記ファブリ・ペロー共振器は、光軸方向に対向する面を焦点とする曲面形状に形成され、かつ光路に所定の反射率の反射面を有するレーザビーム透過部材である一方、前記共振器長制御手段が、前記レーザビーム透過部材の光軸に対する傾きを調整するための駆動機構を制御することを特徴とするレーザ超音波装置。

【請求項 7】 被検査材に超音波を発生させるために変調された励起用レーザビームを発する第 1 のレーザ光源と、前記被検査材を伝播した超音波を観測するための計測用レーザビームを発する第 2 のレーザ光源と、前記励起用レーザビームを前記被検査材の所定の位置に所定の条件で照射するための第 1 の光学手段と、前記計測用レーザビームを前記被検査材の所定の位置に所定の条件で照射するとともに、前記被検査材からの反射光を導くための第 2 の光学手段と、この第 2 の光学手段によって導かれた反射光を入射するファブリ・ペロー共振器と、このファブリ・ペロー共振器の出力光の強度を検出する少なくとも 1 個の光検出手段と、この光検出手段の出力信号レベルあるいは前記計測用レーザビームの一部を前記被検査材を回避した光路で前記ファブリ・ペロー共振器に入射し、その出力光の強度を検出した別の光検出手段の出力信号レベルから前記ファブリ・ペロー共振器の共振長を制御するための共振器長制御手段とを備え、前記第 2 のレーザ光源が波長可変レーザ光源であり、前記光

検出手段のうち 1 つの出力信号レベルから前記波長可変レーザ光源の発振波長を制御することを特徴とするレーザ超音波装置。

【請求項 8】 被検査材に超音波を発生させるために変調された励起用レーザビームを発する第 1 のレーザ光源と、前記被検査材を伝播した超音波を観測するための計測用レーザビームを発する第 2 のレーザ光源と、前記励起用レーザビームを前記被検査材の所定の位置に所定の条件で照射するための第 1 の光学手段と、前記計測用レーザビームを前記被検査材の所定の位置に所定の条件で照射するとともに、前記被検査材からの反射光を導くための第 2 の光学手段と、この第 2 の光学手段によって導かれた反射光を入射するファブリ・ペロー共振器と、このファブリ・ペロー共振器の出力光の強度を検出する少なくとも 1 個の光検出手段と、この光検出手段の出力信号レベルあるいは前記計測用レーザビームの一部を前記被検査材を回避した光路で前記ファブリ・ペロー共振器に入射し、その出力光の強度を検出した別の光検出手段の出力信号レベルから前記ファブリ・ペロー共振器の共振長を制御するための共振器長制御手段とを備え、前記光検出手段のうち 1 つの出力信号レベルが一定となるように前記第 2 のレーザ光源の発振光の周波数をシフトするための可変周波数シフタを設けたことを特徴とするレーザ超音波装置。

【請求項 9】 被検査材に超音波を発生させるために変調された励起用レーザビームを発する第 1 のレーザ光源と、前記被検査材を伝播した超音波を観測するための計測用レーザビームを発する第 2 のレーザ光源と、前記励起用レーザビームを前記被検査材の所定の位置に所定の条件で照射するための第 1 の光学手段と、前記計測用レーザビームを前記被検査材の所定の位置に所定の条件で照射するとともに、前記被検査材からの反射光を導くための第 2 の光学手段と、この第 2 の光学手段によって導かれた反射光を入射するファブリ・ペロー共振器と、このファブリ・ペロー共振器の出力光の強度を検出する少なくとも 1 個の光検出手段と、周期的な信号を発振するための信号発振手段と、この信号発振手段の出力信号に応じて前記第 2 のレーザ光源の 1 波長以上の長さだけ前記ファブリ・ペロー共振器の少なくとも 1 枚のミラーを光軸に平行に直線的に動作させるための駆動手段とを備え、前記信号発振手段の出力信号に同期して前記第 1 のレーザ光源を発振させることを特徴とするレーザ超音波装置。

【請求項 10】 請求項 9 記載のレーザ超音波装置において、前記光検出手段の出力信号レベルあるいは前記計測用レーザビームの一部を前記被検査材を回避した光路で前記ファブリ・ペロー共振器に入射し、その出力光の強度を検出した別の光検出手段の一つの信号レベルが所定の状態にある場合、前記第 1 のレーザ光源を発振させるための発振制御手段を備えたことを特徴とするレーザ

超音波装置。

【請求項 11】 請求項 9 または 10 記載のレーザ超音波装置において、前記第 1 のレーザ光源がパルス発振光源であり、前記第 2 のレーザ光源の光路上に配置され間欠的に動作する光増幅手段と、前記光検出手段の出力信号レベルあるいは前記計測用レーザビームの一部を前記被検査材を回避した光路で前記ファブリ・ペロー共振器に入射し、その出力光の強度を検出した別の光検出手段の一つの信号レベルが所定の状態にある場合、前記第 1 のレーザ光源を発振させ、かつ前記第 1 のレーザ光源が発振した時刻から所定の時刻遅れをもって前記光増幅手段を動作させるための発振制御手段とを備えたことを特徴とするレーザ超音波装置。

【請求項 12】 請求項 9 または 10 記載のレーザ超音波装置において、前記第 1 のレーザ光源の発振時刻を基準とし、所定の時間遅れと所定の時間幅で前記光検出手段の感度を調整する感度調整手段を備えたことを特徴とするレーザ超音波装置。

【請求項 13】 被検査材に超音波を発生させるために変調された励起用レーザビームを発する第 1 のレーザ光源と、前記被検査材を伝播した超音波を観測するための計測用レーザビームを発する第 2 のレーザ光源と、前記励起用レーザビームを前記被検査材の所定の位置に所定の条件で照射するための第 1 の光学手段と、前記計測用レーザビームを前記被検査材の所定の位置に所定の条件で照射するとともに、前記被検査材からの反射光を導くための第 2 の光学手段と、この第 2 の光学手段によって導かれた反射光を入射するファブリ・ペロー共振器と、このファブリ・ペロー共振器の出力光の強度を検出する少なくとも 1 個の光検出手段とを備え、前記第 2 のレーザ光源が周期的にある範囲で波長が走査される波長可変レーザ光源であり、前記光検出手段の出力信号レベルあるいは前記計測用レーザビームの一部を前記被検査材を回避した光路で前記ファブリ・ペロー共振器に入射し、その出力光の強度を検出した別の光検出手段の一つの信号レベルが所定の状態にある場合、前記第 1 のレーザ光源を発振させるための発振制御手段を設けたことを特徴とするレーザ超音波装置。

【請求項 14】 請求項 9 ないし 12 のいずれかに記載のレーザ超音波装置において、周期的な信号を発振するための信号発振手段によって動作する駆動機構は、前記ファブリ・ペロー共振器の 2 枚のミラーの間に挿入され、かつ透過長さを前記第 2 のレーザ光源の発振波長の長さ以上の距離だけ調整可能な正 2n 角形状（但し、n は 2 以上の整数）を有するレーザビーム透過部材であることを特徴とするレーザ超音波装置。

【請求項 15】 請求項 9 ないし 14 のいずれかに記載のレーザ超音波装置において、前記光検出手段の一つの出力信号の特徴量を抽出する信号監視手段と、この信号監視手段で抽出された特徴量と予め設定しておいた基準

値とを比較する比較手段と、この比較手段の結果を表示する表示手段とを備えたことを特徴とするレーザ超音波装置。

【請求項 16】 請求項 9 ないし 14 のいずれかに記載のレーザ超音波装置において、前記光検出手段の一つの出力信号の特徴量を抽出する信号監視手段と、前記ファブリ・ペロー共振器の長さおよびそのミラーの 2 次元的な傾きを調整するため調整機構と、前記信号監視手段で抽出された特徴量が予め設定しておいた基準値となるように前記調整機構を駆動するための調整制御手段とを備えたことを特徴とするレーザ超音波装置。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、例えば小型、高温、狭隙部または稼動部などのように接触や近接が困難な計測対象において、き裂や欠陥の検査あるいは材料評価を非接触かつ非破壊で高精度に行うレーザ超音波装置に関する。

【0002】

【従来の技術】例えば、発電プラントの機器や構造材料のき裂検査を行う一手段として、近年レーザ超音波法が提案されている。この技術の概要については、例えば「山脇：“レーザ超音波と非接触材料評価”、溶接学会誌、第 64 巻、No. 2、P. 104-108（1995 年発行）」などに記載されているように、被検査材に対し、多くの場合パルスレーザ光を照射することで発生する熱的応力、あるいは気化反力を利用して超音波を送信する一方、多くの場合連続発振する別のレーザ光を受信点に照射し、その直進性や可干渉性を用いて超音波によって誘起される変位を受信する技術である。超音波を用いて材料のき裂や内在欠陥の検出、あるいは材料特性を評価可能であることは周知技術であり、レーザ超音波法によれば、これらを非接触で行うことが可能であり、種々の材料評価分野への応用が期待されている。

【0003】レーザ超音波法における超音波の送受信手段としては、いくつか異なる光学系が提案されており、パルスレーザ光照射による超音波の発生と、ファブリ・ペロー共振器を用いた超音波の受信については、図 34 に示すものがある。図 34 は従来のレーザ超音波装置を示すブロック構成図である。

【0004】図 34 に示すように、超音波発生用のレーザ光源 1 から発振したレーザ光 EL は、ミラー 2a、2b およびレンズ 3 を介して被検査材 4 表面の所定位置に所定のビーム形状で照射される。このレーザ光源 1 としては、Q スイッチ YAG レーザなどが多く用いられる。したがって、従来のレーザ超音波装置では、被検査材 4 と照射レーザ光 EL との相互作用により、被検査材 4 に縦波、横波、表面波など種々のモードの超音波が発生し、その超音波は被検査材 4 に含まれるき裂、欠陥あるいは被検査材 4 の材料特性により反射、散乱、音速変化

などの現象が発生し、ここではそれらについての詳細な説明を割愛する。いずれにしても、ある伝播過程に基づいて伝播した超音波が被検査材 4 上の任意の計測点に到達すると、その部位に変位を生じる。

【0005】一方、図 34 において、超音波検出用のレーザ光源 5 から発振したレーザ光 ML は、1/2 波長板 6 で偏光面が制御された後、偏光ビームスプリッタ、レンズ 8 を介して被検査材 4 上の計測点に照射する。このレーザ光源 5 としては、周波数安定化 He-Ne レーザ、アルゴンレーザ、YAG レーザなどの連続発振レーザ光源が多く用いられる。

【0006】そして、超音波の到達により計測点に変位する際、その点に照射され反射されるレーザ光 ML の周波数は、ドブラー効果によって振動速度に比例した量だけシフトし、照射と同経路を經由して偏光ビームスプリッタ 7 に戻される。ここで、被検査材 4 の表面が光学的に粗ければ、反射光の偏向はランダムになっているため、偏光ビームスプリッタ 7 によってその半分は反射され、ミラー 9 を介してファブリ・ペロー共振器 (FP) 10 に導かれる。仮に、被検査材 4 が光学的に良好な表面であるならば、偏光ビームスプリッタ 7 よりも被検査材 4 側に 1/4 波長板を挿入しておけば、より効率的に計測光 PL を集光することができる。ファブリ・ペロー共振器 10 に導かれた光成分 PL の一部は、ファブリ・ペロー共振器 10 を透過した後、レンズ 11 を経てフォトダイオードなどの光検出器 12 に導かれる。この光検出器 12 では、ファブリ・ペロー共振器 10 の透過光強度が電気信号に変換され、この電気信号が信号処理装置 13 で所定の信号に増幅されるとともに、フィルタリングされて表示装置 14 にて表示・記録される。

【0007】次に、ファブリ・ペロー共振器 10 の動作について説明する。

【0008】ファブリ・ペロー共振器 10 は、図 34 に示すように反射率が共に 100% よりも小さい対向する 2 枚のミラー 10a、10b から構成される光学共振器であり、これらミラー 10a と 10b との間隔  $r$  が入射される光の波長  $\lambda$  の整数  $n$  倍である時、ミラー 10a と 10b との間で光が共振して透過光量  $I$  が最大となるものである。

【0009】図 35 は共振器長  $r$  を人為的に波長  $\lambda$  以上の距離走査した場合のファブリ・ペロー共振器 10 の透過光量  $I$  の変化を示す。図 35 に示すように、共振器長  $r$  が波長  $\lambda$  の整数  $n$  倍になると時点で透過光量  $I$  が最大となり、その後速やかに減衰するという挙動を波長ごとに繰り返すことが分かる。

【0010】一方、図 35 に示す曲線で単位長さ変化当たりの透過光量変化率が最大となる A 点に共振器長  $r$  を固定し、光周波数  $\nu$  ( $=c/\lambda$ ;  $c$ : 光速) を走査した場合の透過光量  $I$  の変化を図 36 に示す。これは相対的には光周波数  $\nu$  (あるいは波長  $\lambda$ ) を固定して共振器長  $r$

を変化させた場合と同じ挙動となり、 $(\nu_0 + \Delta \nu) = r/n$  でピークを有する曲線となる。

【0011】このように調整されたファブリ・ペロー共振器 10 に被検査材 4 から反射された光 PL を入射する場合について説明する。通常の場合、被検査材 4 の表面は静止しているため、その被検査材 4 表面で反射された光 PL の周波数は  $\nu_0$  のままであり、ファブリ・ペロー共振器 10 の透過光量  $I$  は  $I_0$  で一定である。

【0012】しかし、超音波が計測点に到達すると、上述したように計測光 PL の周波数は、ドブラシフトにより  $\pm \nu_D$  だけ変化するので、図 36 に模式的に示した通り、ファブリ・ペロー共振器 10 の透過光量  $I$  もそれに応じて  $\pm I_D$  だけ変化することになる。

【0013】すなわち、ファブリ・ペロー共振器 10 によって、超音波の到達を透過光量の強度変化として検出することが可能となる。この光の強度変化は、アバランシェフォトダイオード (以下、APD という)、PIN フォトダイオード (以下、PIN-PD という)、フォトダイオード (以下、PD という)、光電子増倍管 (以下、PM という) などの光検出器 12 を用いて電気信号に変換することができるので、オシロスコープなどを用いて横軸に時間、縦軸に電気信号強度を表示させれば、超音波信号を表示装置 14 にて表示・記録して観測することができる。

【0014】他方、上述したようにファブリ・ペロー共振器 10 における対向するミラー 10a、10b の間隔  $r$  は、入射される光の波長 (例えば、He-Ne レーザ光の場合約 633 nm) よりも十分短い空間的長さで調整しなければならず、周囲温度変化による部品の熱膨張や、周辺の機械的な振動により、調整が容易にずれることがある。

【0015】そこで、従来では図 37 に示すような共振長制御系を備えたレーザ超音波装置もある。なお、図 37 において図 34 に示すレーザ超音波装置と同一の部分には、同一の符号を付して重複する説明を省略する。他の従来例も同様である。

【0016】このレーザ超音波装置では、図 37 に示すようにレーザ光源 5 から発振したレーザ光 ML は、1/2 波長板 6 で偏光面が制御された後、その一部を偏光ビームスプリッタ 17 で予め分岐し、被検査材 4 を介さずに参照光 RL として偏光ビームスプリッタ 18 を経てファブリ・ペロー共振器 10 に入射させる。このファブリ・ペロー共振器 10 を透過した透過光と被検査材 4 からの反射光 PL とを偏光ビームスプリッタ 19 で分離し、光検出器 20 で検出する。

【0017】ここで、上記参照光 RL は、光路上でいかなる周波数シフトも受けないので、本来ならば光検出器 20 の出力信号レベルは常に一定となるべきである。仮に、光検出器 20 の信号レベルが変化するのであれば、それは共振器長  $r$  が何らかの理由によって変化している

ことを意味するので、光検出器 20 の出力信号レベルを制御器 15 を経由してミラー 10b を駆動する piezo 素子などの駆動機構 16 に入力させ、光検出器 20 の出力信号レベルが一定となるようにミラー 10b を駆動することにより共振器長  $r$  を常に最適値に制御するものである。

【0018】このように構成したことにより、光検出器 12 は超音波計測用の MHz 帯域の高速検出器を、光検出器 20 には外乱振動や温度変化検知用の高々 kHz 帯域の低速検出器をそれぞれ用いることができ、特定の帯域の信号を高感度に検知することができるようになる。なお、この場合、計測光 PL の光路上には、計測光 PL と参照光 RL とを重ねあわせる偏光ビームスプリッタ 18 を透過するように 1/2 波長板 6b を設置しておく必要がある。

【0019】一方、図 37 に示した従来のレーザ超音波装置の簡易型として、図 38 に示すような装置も提案されている。この場合、光検出器 12 では超音波による高周波信号と外乱による低周波信号のいずれも検出可能な広帯域性が要求される。光検出器 12 で検出された信号のうち超音波信号に起因する高周波成分は、制御装置 15 や駆動機構 16 の周波数特性が十分低ければ共振器の動作には影響しないため、実質的には参照光 RL なしに図 37 に示す装置と同等の効果が得られる。

【0020】逆に、被検査材 4 上で計測点を走査させながら計測する場合は、計測点ごとに透過光強度が変化した際、それが共振器の状態が変化したことに起因するか、あるいは被検査材 4 の表面反射率の違いによるかが区別することができない。その上、光検出器 12 で発生するショットノイズは計測帯域の平方根に比例するため、光検出器 12 の広帯域化に起因するノイズの増加が原理的に避けられないという問題もある。

【0021】

【発明が解決しようとする課題】従来の技術によるレーザ超音波装置は、被検査材 4 の表面が比較的均一かつ良好な反射特性を有し、しかも超音波により誘起される変位、すなわち周波数シフト量が十分大きく、共振器長  $r$  の変化に与える周辺環境の影響が比較的穏やかな場合には良好な計測が可能である。

【0022】しかしながら、例えば運転中プラントの構造材や機器の検査を行う場合には、被検査材 4 の表面は不均一かつ反射特性も異なることから、ファブリ・ペロー共振器 10 まで導ける光強度が小さいことが予想される。そして、被検査材料の表面性状や内部の特性劣化によって超音波は伝播中に減衰するため、検出すべき超音波の変位、つまり光信号の周波数変化量も小さいことが予想される。

【0023】また、上述のようにファブリ・ペロー共振器 10 の制御は、波長よりも十分短いオーダーで駆動制御する必要があり、高速な圧電素子を用いて比較的重い

ミラーを駆動するには制約があるという課題がある。そして、ファブリ・ペロー共振器 10 の制御は、波長よりも十分短いオーダーで駆動制御する必要があるため、フィールドで使用する場合を想定すると、その初期調整を自動化あるいは容易にすることと、動作中の健全性を表示する必要がある。さらに、周辺環境の影響が多大な場合には、もはや観測される信号レベルからファブリ・ペロー共振器 10 を安定して制御するのは困難になる。

【0024】ところで、従来例における光検出器 12 としては、上述したように主に APD、PIN-PD、PM が用いられているものの、通常の場合、それらは図 39 に示すような内部構成を有している。すなわち、光検出素子 22 に光が入射すると、図 40 に示すように光電変換効果によって光量に比例した電流  $i_{sig}$  が発生し、その電流  $i_{sig}$  は電気的な負荷 24 により電氣的に処理される。ここで、直流電源 23 によって光検出素子 22 に逆バイアス電圧  $V_B$  を印加しておくこと、その印加した電圧に応じて光電変換効率、すなわち光検出素子 22 の感度を向上させることができる。

【0025】しかしながら、光検出素子 22 に高バイアス電圧を常に印加し続けた状態で比較的高強度の光を検出しつづけると、発生した電流  $i_{sig}$  によって光検出素子 22 が加熱され熱雑音が著しく増加する上、電流値が過剰である場合には素子が焼損する場合もある。

【0026】そこで、光検出素子 22 と直列に制限抵抗 25 を接続し、過剰に信号電流が流れるような状況下では、その制限抵抗 25 で電圧降下を生じさせ、光検出素子 22 に印加される電圧を減ずる構成になっている。

【0027】一方、従来のレーザ超音波装置において光検出器 12 は、図 36 を用いて説明したように、常に一定光量  $I_0$  を入射し続け、ある時刻に到達する超音波信号  $U_{sig}$ 、すなわち入射光の周波数の変化を検出光量が  $I_0$  を基準に  $\pm I_0$  だけ変化するという現象をもって検出する、という使用方法が前提である。この際、超音波の検出感度、すなわち単位周波数変化当たりの透過光量変化を最大にするためには、動作点  $I_0$  としては図 36 に示す曲線の変曲点近傍を選択する必要がある、さらには曲線のピークは高ければ高いほど高感度になることが分かる。

【0028】しかしながらこのことは、光量  $I_0$  の絶対値も大きくなることを意味し、上述の通り、図 39 に示すような従来の光検出器 12 では、常時入射し続ける光量  $I_0$  によって流れる一定電流にて制限抵抗 25 で電圧が降下し、光検出素子 22 としては光電変換効率が低く安定した状態で計測に供しななければならない（図 40 参照）。なお、図 40 において、 $I_P$  はピークパワー、 $\tau_M$  は超音波の到達を観察すべき時間、 $\tau_P$  はパルス幅、 $\tau_R$  は繰り返し周期である。一方、制限抵抗 25 を除去すれば、常時入射し続ける光量  $I_0$  によって流れる一定電流にて熱雑音が増加するか、あるいは素子が焼損する



のは避けられない。

【0029】そこで本発明は上記事情を考慮してなされたもので、第1の目的とするところは、微弱な光強度信号を感度良く検出することができ、かつその中に含まれる微小な周波数シフトをノイズレベル以上の大きさに観測できるレーザ超音波装置を提供することにある。

【0030】また、本発明の第2の目的とするところは、例えば高速な周辺外乱にも追従制御可能なレーザ超音波装置を提供することにある。

【0031】さらに、本発明の第3の目的とするところは、例えば連続的な振動環境や温度変化がある環境において使用可能な、ファブリ・ペロー共振器の制御を必要としないレーザ超音波装置を提供することにある。

【0032】そして、本発明の第4の目的とするところは、例えば検査・計測現場に装置を設置した場合に、即座にファブリ・ペロー共振器を調整可能で、しかも動作中にその状態の健全性を確認可能なレーザ超音波装置を提供することにある。

【0033】

【課題を解決するための手段】上記の課題を解決するために、請求項1記載の発明では、被検査材に超音波を発生させるために変調された励起用レーザビームを発する第1のレーザ光源と、前記被検査材を伝播した超音波を観測するための計測用レーザビームを発する第2のレーザ光源と、前記励起用レーザビームを前記被検査材の所定の位置に所定の条件で照射するための第1の光学手段と、前記計測用レーザビームを前記被検査材の所定の位置に所定の条件で照射するとともに、前記被検査材からの反射光を導くための第2の光学手段と、この第2の光学手段によって導かれた反射光を入射するファブリ・ペロー共振器と、このファブリ・ペロー共振器の出力光の強度を検出する少なくとも1個の光検出手段と、この光検出手段の出力信号レベルあるいは前記計測用レーザビームの一部を前記被検査材を回避した光路で前記ファブリ・ペロー共振器に入射し、その出力光の強度を検出した別の光検出手段の出力信号レベルから前記ファブリ・ペロー共振器の共振長を制御するための共振器長制御手段と、前記第1のレーザ光源の変調タイミングを基準とし、所定の時間遅れと所定の時間幅で前記光検出手段の感度を調整する感度調整手段とを備えたことを特徴とする。

【0034】請求項1記載の発明によれば、第1のレーザ光源の変調タイミングを基準とし、所定の時間遅れと所定の時間幅で光検出手段の感度を調整させるための感度調整手段を備えたことにより、微弱な光強度信号を高感度に検出することができ、かつその中に含まれる微小な周波数シフトをノイズレベル以上の大きさに観測することができる。

【0035】請求項2記載の発明では、被検査材に超音波を発生させるために変調された励起用レーザビームを

発する第1のレーザ光源と、前記被検査材を伝播した超音波を観測するための計測用レーザビームを発する第2のレーザ光源と、前記励起用レーザビームを前記被検査材の所定の位置に所定の条件で照射するための第1の光学手段と、前記計測用レーザビームを前記被検査材の所定の位置に所定の条件で照射するとともに、前記被検査材からの反射光を導くための第2の光学手段と、この第2の光学手段によって導かれた反射光を入射するファブリ・ペロー共振器と、このファブリ・ペロー共振器の出力光の強度を検出する少なくとも1個の光検出手段と、この光検出手段のうち1つの出力信号レベルあるいは前記計測用レーザビームの一部を前記被検査材を回避した光路で前記ファブリ・ペロー共振器に入射し、その出力光の強度を検出した別の光検出手段の出力信号レベルから前記ファブリ・ペロー共振器の共振長を制御するための共振器長制御手段と、前記光検出手段の出力信号レベルから前記ファブリ・ペロー共振器への入射光量を調整するとともに、前記第2のレーザ光源の発振光の光路上に配置した光量調整手段とを備えたことを特徴とする。

【0036】請求項2記載の発明によれば、光検出手段のうち1つの出力信号レベルからファブリ・ペロー共振器への入射光量を調整するための光量調整手段を第2のレーザ光源からの発振光の光路上に配置したことにより、請求項1と同様の作用および効果が得られる。

【0037】請求項3記載の発明では、被検査材に超音波を発生させるために変調された励起用レーザビームを発する第1のレーザ光源と、前記被検査材を伝播した超音波を観測するための計測用レーザビームを発する第2のレーザ光源と、前記励起用レーザビームを前記被検査材の所定の位置に所定の条件で照射するための第1の光学手段と、前記計測用レーザビームを少なくとも2つのレーザビームに分岐するための第1の光分岐手段と、この第1の分岐手段によって分岐された少なくとも1つのレーザビームの光周波数を所定量だけシフトするための光変調手段と、前記第1の分岐手段で分岐された他方のレーザビームを前記被検査材の所定の位置に所定の条件で照射するとともに、前記被検査材からの反射光を導き、さらに前記光変調手段によって変調されたレーザビームと同一光路に合成するための第2の光学手段と、この第2の光学手段によって合成された光線を入射するファブリ・ペロー共振器と、このファブリ・ペロー共振器の出力光を前記被検査材からの反射光と前記光変調手段によって変調されたレーザビームに分離する第2の光分岐手段と、この第2の光分岐手段で分離された各々の光信号強度を検出する少なくとも2個の光検出手段と、これらの光検出手段のうち前記光変調手段によって変調されたレーザビームを受光した前記光検出手段の出力信号レベルから前記ファブリ・ペロー共振器の共振長を制御するための共振器長制御手段とを備えたことを特徴とする。



【0038】請求項3記載の発明によれば、第1の分岐手段によって分岐された少なくとも1つのレーザビームの光周波数を所定量だけシフトするための光変調手段を備えたことにより、請求項1と同様の作用および効果が得られる。

【0039】請求項4記載の発明では、被検査材に超音波を発生させるために変調された励起用レーザビームを発する第1のレーザ光源と、前記被検査材を伝播した超音波を観測するための計測用レーザビームを発する第2のレーザ光源と、前記励起用レーザビームを前記被検査材の所定の位置に所定の条件で照射するための第1の光学手段と、前記計測用レーザビームを前記被検査材の所定の位置に所定の条件で照射するとともに、前記被検査材からの反射光を導くための第2の光学手段と、この第2の光学手段によって導かれた反射光を入射するファブリ・ペロー共振器と、このファブリ・ペロー共振器の出力光の強度を検出する少なくとも1個の光検出手段と、この光検出手段のうち1つの出力信号レベルあるいは前記計測用レーザビームの一部を前記ファブリ・ペロー共振器に入射し、その出力光の強度を検出した別の光検出手段の出力信号レベルから前記ファブリ・ペロー共振器の共振長を制御するための共振器長制御手段とを備え、この共振器長制御手段は、前記ファブリ・ペロー共振器の2枚のミラーの間に挿入され、かつ透過長さを調整可能なレーザビーム透過部材であることを特徴とする。

【0040】請求項4記載の発明によれば、共振器長制御手段が、ファブリ・ペロー共振器の2枚のミラーの間に挿入され、かつ透過長さを調整可能なレーザビーム透過部材であることにより、高速な周辺外乱にも追従可能となる。

【0041】請求項5記載の発明では、被検査材に超音波を発生させるために変調された励起用レーザビームを発する第1のレーザ光源と、前記被検査材を伝播した超音波を観測するための計測用レーザビームを発する第2のレーザ光源と、前記励起用レーザビームを前記被検査材の所定の位置に所定の条件で照射するための第1の光学手段と、前記計測用レーザビームを前記被検査材の所定の位置に所定の条件で照射するとともに、前記被検査材からの反射光を導くための第2の光学手段と、この第2の光学手段によって導かれた反射光を入射するファブリ・ペロー共振器と、このファブリ・ペロー共振器の出力光の強度を検出する少なくとも1個の光検出手段と、この光検出手段のうち1つの出力信号レベルあるいは前記計測用レーザビームの一部を前記被検査材を回避した光路で前記ファブリ・ペロー共振器に入射し、その出力光の強度を検出した別の光検出手段の出力信号レベルから前記ファブリ・ペロー共振器の共振長を制御するための共振器長制御手段とを備え、この共振器長制御手段は、前記ファブリ・ペロー共振器を空間的に密閉する密閉手段と、この密閉手段の内部圧力を調整するための圧力調整

手段であることを特徴とする。

【0042】請求項5記載の発明によれば、共振器制御手段が、ファブリ・ペロー共振器を空間的に密閉する密閉手段と、この密閉手段の内部圧力を調整するための圧力調整手段であることにより、請求項4と同様の作用および効果が得られる。

【0043】請求項6記載の発明では、被検査材に超音波を発生させるために変調された励起用レーザビームを発する第1のレーザ光源と、前記被検査材を伝播した超音波を観測するための計測用レーザビームを発する第2のレーザ光源と、前記励起用レーザビームを前記被検査材の所定の位置に所定の条件で照射するための第1の光学手段と、前記計測用レーザビームを前記被検査材の所定の位置に所定の条件で照射するとともに、前記被検査材からの反射光を導くための第2の光学手段と、この第2の光学手段によって導かれた反射光を入射するファブリ・ペロー共振器と、このファブリ・ペロー共振器の出力光の強度を検出する少なくとも1個の光検出手段と、この光検出手段のうち1つの出力信号レベルあるいは前記計測用レーザビームの一部を前記被検査材を回避した光路で前記ファブリ・ペロー共振器に入射し、その出力光の強度を検出した別の光検出手段の出力信号レベルから前記ファブリ・ペロー共振器の共振長を制御するための共振器長制御手段とを備え、前記ファブリ・ペロー共振器は、光軸方向に対向する面を焦点とする曲面形状に形成され、かつ光路に所定の反射率の反射面を有するレーザビーム透過部材である一方、前記共振器長制御手段が、前記レーザビーム透過部材の光軸に対する傾きを調整するための駆動機構を制御することを特徴とする。

【0044】請求項6記載の発明によれば、ファブリ・ペロー共振器が光軸方向に対向する面を焦点とする曲面形状を有し、かつ光路に適切な反射率の反射面を有するレーザビーム透過部材であり、共振器長制御手段が、レーザビーム透過部材の光軸に対する傾きを調整するための駆動機構を制御することにより、請求項4と同様の作用および効果が得られる。

【0045】請求項7記載の発明では、被検査材に超音波を発生させるために変調された励起用レーザビームを発する第1のレーザ光源と、前記被検査材を伝播した超音波を観測するための計測用レーザビームを発する第2のレーザ光源と、前記励起用レーザビームを前記被検査材の所定の位置に所定の条件で照射するための第1の光学手段と、前記計測用レーザビームを前記被検査材の所定の位置に所定の条件で照射するとともに、前記被検査材からの反射光を導くための第2の光学手段と、この第2の光学手段によって導かれた反射光を入射するファブリ・ペロー共振器と、このファブリ・ペロー共振器の出力光の強度を検出する少なくとも1個の光検出手段と、この光検出手段の出力信号レベルあるいは前記計測用レーザビームの一部を前記被検査材を回避した光路で前記

ファブリ・ペロー共振器に入射し、その出力光の強度を検出した別の光検出手段の出力信号レベルから前記ファブリ・ペロー共振器の共振長を制御するための共振器長制御手段とを備え、前記第2のレーザ光源が波長可変レーザ光源であり、前記光検出手段のうち1つの出力信号レベルから前記波長可変レーザ光源の発振波長を制御することを特徴とする。

【0046】請求項7記載の発明によれば、第2のレーザ光源が波長可変レーザ光源であり、光検出手段のうち第1の分光手段によって分岐された他方のレーザビームを受信した光検出手段の出力信号レベルから前記波長可変レーザ光源の発振波長を制御することにより、請求項4と同様の作用および効果が得られる。

【0047】請求項8記載の発明では、被検査材に超音波を発生させるために変調された励起用レーザビームを発する第1のレーザ光源と、前記被検査材を伝播した超音波を観測するための計測用レーザビームを発する第2のレーザ光源と、前記励起用レーザビームを前記被検査材の所定の位置に所定の条件で照射するための第1の光学手段と、前記計測用レーザビームを前記被検査材の所定の位置に所定の条件で照射するとともに、前記被検査材からの反射光を導くための第2の光学手段と、この第2の光学手段によって導かれた反射光を入射するファブリ・ペロー共振器と、このファブリ・ペロー共振器の出力光の強度を検出する少なくとも1個の光検出手段と、この光検出手段の出力信号レベルあるいは前記計測用レーザビームの一部を前記被検査材を回避した光路で前記ファブリ・ペロー共振器に入射し、その出力光の強度を検出した別の光検出手段の出力信号レベルから前記ファブリ・ペロー共振器の共振長を制御するための共振器長制御手段とを備え、前記光検出手段のうち1つの出力信号レベルが一定となるように前記第2のレーザ光源の発振光の周波数をシフトするための可変周波数シフタを設けたことを特徴とする。

【0048】請求項8記載の発明によれば、光検出手段のうち第1の分光手段によって分岐された他方のレーザビームを受信した前記光検出手段の出力信号レベルが一定となるように第2のレーザ光源の発振光の光路上に、その周波数をシフトするための可変周波数シフタを設けたことにより、請求項4と同様の作用および効果が得られる。

【0049】請求項9記載の発明では、被検査材に超音波を発生させるために変調された励起用レーザビームを発する第1のレーザ光源と、前記被検査材を伝播した超音波を観測するための計測用レーザビームを発する第2のレーザ光源と、前記励起用レーザビームを前記被検査材の所定の位置に所定の条件で照射するための第1の光学手段と、前記計測用レーザビームを前記被検査材の所定の位置に所定の条件で照射するとともに、前記被検査材からの反射光を導くための第2の光学手段と、この第

2の光学手段によって導かれた反射光を入射するファブリ・ペロー共振器と、このファブリ・ペロー共振器の出力光の強度を検出する少なくとも1個の光検出手段と、周期的な信号を発振するための信号発振手段と、この信号発振手段の出力信号に応じて前記第2のレーザ光源の1波長以上の長さだけ前記ファブリ・ペロー共振器の少なくとも1枚のミラーを光軸に平行に直線的に動作させるための駆動手段とを備え、前記信号発振手段の出力信号に同期して前記第1のレーザ光源を発振させることを特徴とする。

【0050】請求項9記載の発明によれば、第1のレーザ光源1がパルス発振光源であって、周期的な信号を発振するための信号発振手段と、この信号発振手段の出力信号に応じて第2のレーザ光源の1波長以上の長さだけファブリ・ペロー共振器の少なくとも1枚のミラーを光軸に平行に直線的に動作させるための駆動手段とを備え、前記信号発振手段の出力信号に同期して第1のレーザ光源を発振させることにより、連続的な振動環境や温度変化がある環境において使用可能で、共振器の制御が不要となる。

【0051】請求項10記載の発明では、請求項9記載のレーザ超音波装置において、前記光検出手段の出力信号レベルあるいは前記計測用レーザビームの一部を前記被検査材を回避した光路で前記ファブリ・ペロー共振器に入射し、その出力光の強度を検出した別の光検出手段の一つの信号レベルが所定の状態にある場合、前記第1のレーザ光源を発振させるための発振制御手段を備えたことを特徴とする。

【0052】請求項10記載の発明によれば、光検出手段の出力信号レベルあるいは前記計測用レーザビームの一部を前記被検査材を回避した光路でファブリ・ペロー共振器に入射し、その出力光の強度を検出した別の光検出手段の一つの信号レベルが所定の状態にある場合、第1のレーザ光源を発振させるための発振制御手段を備えたことにより、請求項9と同様の作用および効果が得られる。

【0053】請求項11記載の発明では、請求項9または10記載のレーザ超音波装置において、前記第1のレーザ光源がパルス発振光源であり、前記第2のレーザ光源の光路上に配置され間欠的に動作する光増幅手段と、前記光検出手段の出力信号レベルあるいは前記計測用レーザビームの一部を前記被検査材を回避した光路で前記ファブリ・ペロー共振器に入射し、その出力光の強度を検出した別の光検出手段の一つの信号レベルが所定の状態にある場合、前記第1のレーザ光源を発振させ、かつ前記第1のレーザ光源が発振した時刻から所定の時刻遅れをもって前記光増幅手段を動作させるための発振制御手段とを備えたことを特徴とする。

【0054】請求項11記載の発明によれば、第1のレーザ光源がパルス発振光源であり、第2のレーザ光源の

光路上に配置され間欠的に動作する光増幅手段と、光検出手段の出力信号レベルあるいは計測用レーザビームの一部を被検査材を回避した光路でファブリ・ペロー共振器に入射し、その出力光の強度を検出した別の光検出手段の一つの信号レベルが所定の状態にある場合、前記第1のレーザ光源を発振させ、かつ前記第1のレーザ光源が発振した時刻から所定の時刻遅れをもって前記光増幅手段を動作させるための発振制御手段とを備えたことにより、請求項9と同様の作用および効果が得られる。

【0055】請求項12記載の発明では、請求項9または10記載のレーザ超音波装置において、前記第1のレーザ光源の発振時刻を基準とし、所定の時間遅れと所定の時間幅で前記光検出手段の感度を調整する感度調整手段を備えたことを特徴とする。

【0056】請求項12記載の発明によれば、第1のレーザ光源の発振時刻を基準とし、所定の時間遅れと所定の時間幅で前記光検出手段の感度を調整する感度調整手段を備えたことにより、請求項9と同様の作用および効果が得られる。

【0057】請求項13記載の発明では、被検査材に超音波を発生させるために変調された励起用レーザビームを発する第1のレーザ光源と、前記被検査材を伝播した超音波を観測するための計測用レーザビームを発する第2のレーザ光源と、前記励起用レーザビームを前記被検査材の所定の位置に所定の条件で照射するための第1の光学手段と、前記計測用レーザビームを前記被検査材の所定の位置に所定の条件で照射するとともに、前記被検査材からの反射光を導くための第2の光学手段と、この第2の光学手段によって導かれた反射光を入射するファブリ・ペロー共振器と、このファブリ・ペロー共振器の出力光の強度を検出する少なくとも1個の光検出手段とを備え、前記第2のレーザ光源が周期的にある範囲で波長が走査される波長可変レーザ光源であり、前記光検出手段の出力信号レベルあるいは前記計測用レーザビームの一部を前記被検査材を回避した光路で前記ファブリ・ペロー共振器に入射し、その出力光の強度を検出した別の光検出手段の一つの信号レベルが所定の状態にある場合、前記第1のレーザ光源を発振させるための発振制御手段を設けたことを特徴とする。

【0058】請求項13記載の発明によれば、第2のレーザ光源が周期的にある範囲で波長が走査される波長可変レーザ光源であり、光検出手段の出力信号レベルあるいは前記計測用レーザビームの一部を前記被検査材を回避した光路でファブリ・ペロー共振器に入射し、その出力光の強度を検出した別の光検出手段の一つの信号レベルが所定の状態にある場合、第1のレーザ光源を発振させるための発振制御手段を設けたことにより、請求項9と同様の作用および効果が得られる。

【0059】請求項14記載の発明では、請求項9ないし12のいずれかに記載のレーザ超音波装置において、

周期的な信号を発振するための信号発振手段によって動作する駆動機構は、前記ファブリ・ペロー共振器の2枚のミラーの間に挿入され、かつ透過長さを前記第2のレーザ光源の発振波長の長さ以上の距離だけ調整可能な正2n角形状（但し、nは2以上の整数）を有するレーザビーム透過部材であることを特徴とする。

【0060】請求項14記載の発明によれば、周期的な信号を発振するための信号発振手段によって動作する駆動機構が、ファブリ・ペロー共振器の2枚のミラーの間に挿入され、かつ透過長さを第2のレーザ光源の発振波長の長さ以上の距離だけ調整可能な正2n角形状（但し、nは2以上の整数）を有するレーザビーム透過部材であることにより、請求項9と同様の作用および効果が得られる。

【0061】請求項15記載の発明では、請求項9ないし14のいずれかに記載のレーザ超音波装置において、前記光検出手段の1つの出力信号の特徴量を抽出する信号監視手段と、この信号監視手段で抽出された特徴量と予め設定しておいた基準値とを比較する比較手段と、この比較手段の結果を表示する表示手段とを備えたことを特徴とする。

【0062】請求項15記載の発明によれば、光検出手段の1つの出力信号の特徴量を抽出する信号監視手段と、この信号監視手段で抽出された特徴量と予め設定しておいた基準値とを比較する比較手段と、この比較手段の結果を表示する表示手段とを備えたことにより、検査・計測現場に装置を設置した場合に、即座に共振器を調整可能で、しかも動作中にその状態の健全性を確認することができる。

【0063】請求項16記載の発明は、請求項9ないし14のいずれかに記載のレーザ超音波装置において、前記光検出手段の1つの出力信号の特徴量を抽出する信号監視手段と、前記ファブリ・ペロー共振器の長さおよびそのミラーの2次元的な傾きを調整するため調整機構と、前記信号監視手段で抽出された特徴量が予め設定しておいた基準値となるように前記調整機構を駆動するための調整制御手段とを備えたことを特徴とする。

【0064】請求項16記載の発明によれば、光検出手段の1つの出力信号の特徴量を抽出する信号監視手段と、ファブリ・ペロー共振器の長さおよびそのミラーの2次元的な傾きを調整するため調整機構と、信号監視手段で抽出された特徴量が予め設定しておいた基準値となるように前記調整機構を駆動するための調整制御手段とを備えたことにより、請求項15と同様の作用および効果が得られる。

【0065】

【発明の実施の形態】以下、本発明に係るレーザ超音波装置の実施形態を図面に基ついて説明する。

【0066】〔第1実施形態〕図1は本発明に係るレーザ超音波装置の第1実施形態を示すブロック構成図であ

る。なお、従来の構成と同一または対応する部分には、図 3 4 ~ 図 4 0 と同一の符号を用いて説明する。

【0067】図 1 に示すように、第 1 のレーザ光源としての超音波発生用のレーザ光源 1 は、被検査材 4 に超音波を発生させるために変調されており、このレーザ光源 1 から発振したレーザ光 EL は、第 1 の光学手段を構成するミラー 2 a、2 b およびレンズ 3 を介して被検査材 4 表面の所定位置に所定のビーム形状（所定条件）で照射される。

【0068】また、第 2 のレーザ光源としての超音波検出用のレーザ光源 5 は、被検査材 4 を伝播した超音波を観測するための計測用レーザビームを発生し、この発振したレーザ光 ML は、1/2 波長板 6 a で偏光面が制御された後、偏光ビームスプリッタ 1 7 および偏光ビームスプリッタ（第 1 の光分岐手段）7、レンズ 8 を介して被検査材 4 上の計測点に照射される。すなわち、レーザ光源 5 から発振したレーザ光 ML は、1/2 波長板 6 a で偏光面が制御された後、その一部を偏光ビームスプリッタ 1 7 で予め分岐し、被検査材 4 を介さずに参照光 RL として偏光ビームスプリッタ 1 8 を経てファブリ・ペロー共振器 1 0 に入射させる。一方、被検査材 4 からの反射光（以下、計測光ともいう）PL は、レンズ 8、偏光ビームスプリッタ 7、ミラー 9、1/2 波長板 6 b および偏光ビームスプリッタ 1 8 を介してファブリ・ペロー共振器 1 0 に入射する。ここで、1/2 波長板 6 a、偏光ビームスプリッタ 1 7 および 7、レンズ 8、ミラー 9、1/2 波長板 6 b および偏光ビームスプリッタ 1 8 により第 2 の光学手段が構成される。

【0069】上記ファブリ・ペロー共振器 1 0 を透過した参照光 RL は、被検査材 4 からの反射光 PL とをレンズ 1 1 を経て第 2 の光分岐手段としての偏光ビームスプリッタ 1 9 で分離された後、別の光検出手段としての光検出器 2 0 で検出される。

【0070】ここで、上記参照光 RL は、光路上でいかなる周波数シフトも受けないので、本来ならば光検出器 2 0 の出力信号レベルは常に一定となるべきである。仮に、光検出器 2 0 の信号レベルが変化するのであれば、それは共振器長  $r$  が何らかの理由によって変化していることを意味するので、光検出器 2 0 の出力信号レベルを共振器長制御手段としての制御器 1 5 を経てミラー 1 0 b を駆動するピエゾ素子などの駆動機構 1 6 に入力させ、光検出器 2 0 の出力信号レベルが一定となるように駆動機構 1 6 によりミラー 1 0 b を駆動させることにより、共振器長  $r$  を常に最適値になるように制御している。

【0071】一方、被検査材 4 からファブリ・ペロー共振器 1 0 を透過した反射光 PL は、レンズ 1 1 を経て偏光ビームスプリッタ 1 9 で分離され、光検出手段としての光検出器 1 2 に導かれ、この光検出器 1 2 でファブリ・ペロー共振器 1 0 の透過強度が電気信号に変換され、

この電気信号が信号処理装置 1 3 で増幅、フィルタリングされた後、表示装置 1 4 にて表示・記録される。

【0072】ところで、本実施形態では、光検出器 1 2 の内部構成を変えると同時に、光検出器 1 2 に印加する逆バイアス電圧を調整する感度調整手段 3 1 によって光検出器 1 2 の動作を制御するようにしている。この光検出器 1 2 としては、上述したように主に APD、PIN-  
PD、PM が用いられている。

【0073】光検出器 1 2 は、図 2 に示すように光検出素子 2 2 に光が入射すると、光電変換効果によって光量に比例した電流  $i_{sig}$  が発生し、この電流  $i_{sig}$  は電気的な負荷 2 4 により電氣的に処理される。ここで、直流電源 2 3 によって光検出素子 2 2 に逆バイアス電圧  $V_B$  を印加しておく、と、印加した電圧に応じて光電変換効率、すなわち光検出素子 2 2 の感度を向上させることができる。しかしながら、常に高バイアス電圧を印加し続けた状態で比較的高強度の光を検出し続けると、発生した電流  $i_{sig}$  によって光検出素子 2 2 が加熱され熱雑音が著しく増加する上、電流値が過剰である場合には素子が焼損する場合もある。

【0074】そこで、本実施形態では、光検出素子 2 2 と直列にスイッチ 2 6 を接続した内部構成であり、このスイッチ 2 6 の動作を感度調整手段 3 1 で制御するようにしている。すなわち、本実施形態では、レーザ光源 1 の変調タイミングを基準として感度調整手段 3 1 により所定の時間遅れと所定の時間幅で光検出器 1 2 の感度を調整するようにしたものである。

【0075】この感度調整手段 3 1 の動作を図 3 を参照しながら説明する。

【0076】今、使用するレーザ光源 1 の仕様をピークパワー  $I_P$ 、パルス幅  $\tau_P = 10 \text{ nsec}$ 、繰り返し周波数  $50 \text{ Hz}$ （繰り返し周期  $\tau_R = 20 \text{ msec}$ ）とする。ここで、観察すべき超音波の伝播現象の継続時間としては次のように概算することができる。例えば、被検査材 4 が炭素鋼の場合、縦波、横波、表面波のうちで最も音速の低い表面波であっても音速約  $2,900 \text{ m/sec}$  である。

【0077】そして、観察すべき範囲を距離  $1 \text{ m}$  としても、その伝播時間、つまり超音波の到達を観察すべき時間  $\tau_M$  は約  $330 \mu \text{ sec}$  でしかない。すなわち、超音波を検出するために計測系が高感度な状態に保たれていなければならないのは、 $20 \text{ msec}$  ごとに 1 波送信される超音波に対し、高々約  $330 \mu \text{ sec}$  でよいことが分かる。

【0078】したがって、レーザ光源 1 の発振タイミングを感度調整手段 3 1 にて検知し、その後適当な時間遅れ  $\tau_D$  をもってスイッチ 2 6 を ON して光検出素子 2 2 に最大感度が得られる逆バイアス電圧  $V_B$  を印加し、観察時間終了後には感度調整手段 2 1 が速やかにスイッチ 2 6 を OFF するように動作させれば、超音波信号 U

$i_{sig}$  を観察すべきタイミングでは光検出器 12 の感度が最大であり、しかも 20 msec のうち観察時間  $\tau_M$  以外の約 19.7 msec は電流  $i_{sig}$  がほとんど流れていない状態に保持することができるので、光検出素子 22 の温度上昇による熱雑音や焼損を免れることが可能となる。

【0079】なお、時間遅れ  $\tau_D$  は、レーザ光源 1 から発振される非常に高強度なパルス光が計測系に混入するのを防ぐために設けるものであり、パルス幅  $\tau_P = 10$  nsec に比べて十分長く、しかも観察時間  $\tau_M = 330 \mu\text{sec}$  と比べて十分短い時間、例えば  $1 \mu\text{sec}$  程度であればよい。あるいは計測系における波長フィルタリングが十分であれば 0 であっても構わない。

【0080】また、逆バイアス電圧  $V_B$  の立上がり回路の時定数などで遅くなる場合には、図 4 (B) に示すオン信号を (A) に示す光パルス信号に対して先行時間  $\tau_F$  だけ先行して発生させるようにすればよい。

【0081】このように本実施形態によれば、レーザ光源 1 の変調タイミングを基準として感度調整手段 31 により所定の時間遅れと所定の時間幅で光検出器 12 の感度を調整するようにしたので、微弱な光強度信号を高感度で検出することができ、かつその中に含まれる微小な周波数シフトをノイズレベル以上の大きさに観測することができる。

【0082】〔第 1 実施形態の変形例〕図 5 は本発明に係るレーザ超音波装置の第 1 実施形態の変形例を示すブロック構成図である。なお、前記第 1 実施形態と同一または対応する部分には同一の符号を付して説明する。以下の各実施形態および変形例も同様である。

【0083】この変形例は、前記第 1 実施形態を図 38 に示す簡易型のレーザ超音波装置に適用したものであり、感度調整手段 31 および光検出器 12 の構成および動作は前記第 1 実施形態と同様であるが、光検出器 12 の出力信号はファブリ・ペロー共振器 10 の制御にも用いられるため、前記第 1 実施形態において  $330 \mu\text{sec}$  だけ感度が変化する効果が制御に影響しないように、制御器 15 あるいは駆動機構 16 の時定数をそれよりも十分遅く設定する必要がある。したがって、この変形例でも前記第 1 実施形態と同様の効果が得られる。

【0084】なお、この変形例の装置構成とはほぼ同等の効果をもつより簡単な構成としては、感度調整手段として光検出器 12 の直前の光路上に光路を開閉するためのシャッターを設ける構成も考えられる。このシャッターとしては、不透明な物質を動作させて機械的に光路を遮断するものの他、液晶シャッターなども考えられる。但し、これらの要素は動作時間が比較的遅いため、感度調整手段の動作時間が比較的遅い場合には実現可能であるが、上記のように  $\mu\text{sec}$  オーダーで光検出器 12 の検出感度を制御する時には不向きである。

【0085】〔第 2 実施形態〕図 6 は本発明に係るレー

ザ超音波装置の第 2 実施形態を示すブロック構成図である。

【0086】図 6 に示すように、本実施形態では、レーザ光 EL によって励起された超音波を、レーザ光 RL を用いて安定に制御したファブリ・ペロー共振器 10 に、被検査材 4 上の計測点からの反射光である計測光 PL を入射することによって計測する動作は、前記第 1 実施形態と同様である。

【0087】本実施形態では、光検出器 12 の出力信号の特徴量から光量調整手段 37 を用いて、例えば計測光 PL の光路上に 1/2 波長板 6b を設置し、この 1/2 波長板 6b を回転させてファブリ・ペロー共振器 10 に入射する光量を最適値になるように制御している。

【0088】図 1 および図 2 に基づいて上記で説明したように、通常のレーザ超音波装置の光検出器 12 においては、原理的には入射光量が大いほど高感度に超音波信号が検出可能であるが、検出装置の制約から、ある一定値以上の光量が入射すると光検出素子 22 の感度が低下して、全体の検出感度は低下すると推定される。

【0089】したがって、図 7 に模式的に示すように中間領域に最適な入射光量  $I_c$  が存在すると考えられる。したがって、光検出器 12 を用いる場合には、予めファブリ・ペロー共振器 10 に入射する光量を光検出器 12 にて  $I_c$  の光量が得られるように調整しておくのが感度上得策である。

【0090】しかしながら、運転中プラントの構造材料などの表面は、様々な反射率、反射指向性を有するため常に一定の反射光量を保持するのは不可能である。そこで、レーザ光源 5 からは、予め想定される反射特性下においてやや過剰な反射光量が得られる程度のレーザ光 ML を発振しておき、光検出器 12 の出力信号レベルから、 $I_o = I_c$  となるように光量調整手段 37 を用いて 1/2 波長板 6b を回転させて偏光ビームスプリッタ 18 を透過する計測光 PL、すなわちファブリ・ペロー共振器 10 に入射する光量を調整すれば、通常の光検出器 12 を用いた場合でも、常に最適な検出感度で超音波信号を検出することが可能となる。

【0091】但し、この場合、共振器長の変化による光量変化に光量調整手段 37 が追従しないよう、この光量調整手段 37 は制御器 15 および駆動機構 16 よりも十分遅く、かつ被検査材 4 上における計測点の変化よりも早い時定数に設定しておく必要がある。

【0092】また、光検出器 12 の出力信号の特徴量としては、信号の DC レベルでもよいし、あるいは超音波信号 (AC 成分) の最大振幅値でもよい。さらに、波長板でなく、計測光 PL の光路上に光波衰器を設置して、この光波衰器を調整しても同様の効果が得られる。

【0093】このように本実施形態によれば、光検出器 12 の出力信号レベルからファブリ・ペロー共振器 10 への入射光量を調整するため、光量調整手段 37 を用い

て回転させる 1/2 波長板 6 b をレーザ光源 5 からの計測光 PL の光路上に配置したことにより、前記第 1 実施形態と同様に、微弱な光強度信号を高感度で検出することができ、かつその中に含まれる微小な周波数シフトをノイズレベル以上の大きさに観測することができる。

【0094】〔第 2 実施形態の変形例〕図 8 は本発明に係るレーザ超音波装置の第 2 実施形態の変形例を示すブロック構成図である。

【0095】この変形例は、前記第 2 実施形態を図 3 8 に示す簡易型のレーザ超音波装置に適用したものであり、図 8 に示すように光量調整手段 3 7 によって計測光 PL 上に設置された光減衰器 3 8 を駆動するように構成されており、その他の作用および効果は前記第 2 実施形態と同様である。

【0096】また、レーザ光源 5 の発振出力が制御可能である場合には、光検出器 1 2 の出力信号レベルに基づいてレーザ光源 5 の発振出力を制御しても同じ効果が得られ、波長板の駆動機構や光減衰器などが不要となり、構造の簡素化が図れる。但し、この場合、参照光 RL の光量もそれに応じて変化するため、ファブリ・ペロー共振器 1 0 の制御には注意を要する。

【0097】〔第 3 実施形態〕図 9 は本発明に係るレーザ超音波装置の第 3 実施形態を示すブロック構成図である。

【0098】図 9 に示すように、本実施形態でも、レーザ光 EL によって励起された超音波を、被検査材 4 上の計測点からの反射光である計測光 PL をファブリ・ペロー共振器 1 0 に入射することによって計測する基本的な動作は、前記第 1 実施形態と同様である。

【0099】本実施形態は、第 1 の光分岐手段としての偏光ビームスプリッタ 1 7 にて分岐した参照光 RL の周波数を発振器 3 9 で駆動する光変調手段としての光変調器 4 0 を用いてシフトさせ、計測光 PL と周波数（すなわち波長）が若干異なるレーザ光を用いてファブリ・ペロー共振器 1 0 の制御を行うものである。

【0100】ファブリ・ペロー共振器 1 0 を用いて対象の振動、すなわち光のドップラーシフト成分を最大感度で検出するためには、図 3 5 および図 3 6 で説明した通り共振器は透過光量曲線の変曲点、すなわち図中 A 点に制御する必要がある。

【0101】しかし、運転中プラントの構造材料などを被検査材とする場合、対象表面からの反射光 PL の光量はその表面状態に依存し、透過光量曲線のピークは変化する。したがって、単調増加する信号変化の中で A 点を探すのは困難であり、多くの場合に想定される一定レベルで制御せざるを得ない。

【0102】そこで、本実施形態では、光変調器 3 0 を用いて図 1 0 に示すようにバンド幅  $f_B$  の半分だけ参照光 RL の周波数を予めシフトさせておき、そのピーク

（図中 B 点）で制御を行えば、より簡単に最大感度点でファブリ・ペロー共振器 1 0 を制御することが可能となる。

【0103】このように本実施形態によれば、偏光ビームスプリッタ 1 7 にて分岐した参照光 RL の周波数を発振器 3 9 で駆動する光変調器 4 0 を用いてシフトさせることにより、前記第 1 実施形態と同様の効果が得られる。

【0104】〔第 4 実施形態〕図 1 1 は本発明に係るレーザ超音波装置の第 4 実施形態を示すブロック構成図である。

【0105】図 1 1 に示すように、本実施形態でも、レーザ光 EL によって励起された超音波を、被検査材 4 上の計測点からの反射光である計測光 PL をファブリ・ペロー共振器 1 0 に入射することによって計測する基本的な動作は、前記第 1 実施形態と同様である。

【0106】本実施形態は、ファブリ・ペロー共振器 1 0 を構成するミラー 1 0 a, 1 0 b 間に回転ステージ 4 1 上に設置されたレーザビーム透過部材である透過板 4 2 を配置し、回転ステージ 4 1 を参照光 RL の信号レベルを検出した光検出器 2 0 の出力信号に基づいて共振器制御手段としての制御器 1 5 によって駆動するようにしたものである。

【0107】ところで、図 3 7 に示すように通常のレーザ超音波装置では、共振器長  $r$  の調整は、ファブリ・ペロー共振器 1 0 を構成するミラー 1 0 a, 1 0 b の片方（図 3 7 ではミラー 1 0 b）にピエゾ素子などの駆動機構 1 6 を設置し、この駆動機構 1 6 によりミラー 1 0 b を光軸と平行に微動することで、共振器長  $r$  が適当な  $n$  入のピークにおける A 点になるよう調整するものである。しかし、上記ピエゾ素子では、比較的重量物である光学ミラーを高速に動作することは不可能であるという問題がある。

【0108】そこで、本実施形態のレーザ超音波装置では、共振器長  $r$  の制御をピエゾ素子等による直線駆動ではなく、回転ステージ 4 1 による回転駆動に置き換えたものである。この回転ステージ 4 1 による共振器長の制御手段を図 1 2 を参照して説明する。

【0109】図 1 2 (A) に示すように、ファブリ・ペロー共振器 1 0 中の光路  $l_{org}$  に対して、厚さ  $d$ 、屈折率  $n_2$  の透過板 4 2 が垂直に挿入されている場合には、光路長の変化はなく、共振器長はミラー 1 0 a と 1 0 b との間隔で決まる距離となる。ここで、図 1 2

(B) に示すように回転ステージ 3 1 を用いて透過板 4 2 を角度  $\theta_1$  だけ回転させると、周辺媒質（例えば空気など）の屈折率  $n_1$  と透過板 4 2 の屈折率  $n_2$  との差異により光は屈折し、光路は  $l_{org}$  のようになる。この時、光路  $l_{var}$  と光路  $l_{org}$  では、長さ

【数 1】



$$l_{var} - l_{org} = \frac{d}{\cos \theta_2} \{1 - \cos(\theta_1 - \theta_2)\}$$

但し、

【数2】

$$\sin \theta_2 = \frac{n_1}{n_2} \sin \theta_1$$

だけの光路長差が生じる。このようにすれば、回転ステージ41の回転動作によって比較的容易に光路長を制御することが可能である上、透過板42の厚さdを適切に

選択すれば、高速な光路長調整が可能となる。  
 【0110】このように本実施形態によれば、ファブリ・ペロー共振器10を構成するミラー10a、10b間に共振長調整手段である透過板42を配置し、この透過板42を回転させる回転ステージ41を共振器制御手段である制御器15によって駆動制御することにより、ファブリ・ペロー共振器10の制御を波長より十分短いオーダーで駆動制御することが可能となり、高速な周辺外乱にも追従制御することができる。

【0111】〔第4実施形態の変形例〕図13は本発明に係るレーザ超音波装置の第4実施形態の変形例を示すブロック構成図である。

【0112】この変形例は、前記第4実施形態を図38に示す簡易型のレーザ超音波装置に適用したものであり、光検出器12の出力信号をファブリ・ペロー共振器10の制御にも用いられる以外の作用および効果は前記第4実施形態と同様である。

【0113】〔第5実施形態〕図14は本発明に係るレーザ超音波装置の第5実施形態を示すブロック構成図である。

【0114】図14に示すように、本実施形態でも、レーザ光ELによって励起された超音波を、被検査材4上の計測点からの反射光である計測光PLをファブリ・ペロー共振器10に入射することによって計測する基本的な動作は、前記第1実施形態と同様である。

【0115】本実施形態では、ファブリ・ペロー共振器10が圧力制御可能な密閉容器44で覆われていることにある。

【0116】ところで、図37に示すように通常のレーザ超音波装置では、周辺温度変化などによる共振器長rの変化をファブリ・ペロー共振器10を構成するミラー10a、10bの片方（図では10b）にピエゾ素子などの駆動手段16を設置し、この駆動手段16によりミラー10bを光軸と平行に、変化を相殺する距離だけ微動することで補償していた。しかしながら、補償すべき偏差量はもともと小さいことが望まれる。

【0117】そこで、本実施形態のレーザ超音波装置では、ファブリ・ペロー共振器10を密閉手段としての密閉容器44で完全に密閉し、しかも密閉容器44内を

示さない圧力調整手段にてほぼ真空状態に圧力制御することにより、熱的・圧力的に変化の少ない雰囲気を作り出すことで、もともとの偏差量を小さく抑制するようにしている。

【0118】また、ファブリ・ペロー共振器10を構成する2枚のミラー10a、10bの反射率もファブリ・ペロー共振器10の透過性能に大きく影響するため、密閉容器44で外界と遮断することで、ダストの付着や異物による反射面の損傷を防ぎ、反射率の設計値からの変化を小さくすることが可能となる。

【0119】このように本実施形態によれば、ファブリ・ペロー共振器10を密閉容器44で完全に密閉し、しかも密閉容器44内を図示しない圧力調整手段にてほぼ真空状態に圧力制御することにより、ファブリ・ペロー共振器10の制御を波長より十分短いオーダーで駆動制御することが可能となり、高速な周辺外乱にも追従制御することができる。

【0120】〔第6実施形態〕図15は本発明に係るレーザ超音波装置の第6実施形態を示すブロック構成図である。

【0121】図15に示すように、本実施形態でも、レーザ光ELによって励起された超音波を、被検査材4上の計測点からの反射光である計測光PLをファブリ・ペロー共振器10に入射することによって計測する基本的な動作は、前記第1実施形態と同様である。

【0122】本実施形態では、ファブリ・ペロー共振器が2枚の対向するミラーから構成されるのではなく、光軸方向に対向する面を焦点とする共焦点形状でかつ対向する面に所定の反射率を有する反射面を有し、熱的に安定であり、しかも計測光PLに対して透明と考え得るレーザビーム透過部材で構成されるファブリ・ペロー共振器10Aを設けたものである。

【0123】ところで、図37に示すように通常のレーザ超音波装置では、周辺温度変化などによる共振器長rの変化をファブリ・ペロー共振器10を構成するミラー10a、10bの片方（図では10b）にピエゾ素子などの駆動手段16を設置し、この駆動手段16によりミラー10bを光軸と平行に、変化を相殺する距離だけ微動することで補償していた。しかしながら、補償すべき偏差量はもともと小さいことが望まれる。

【0124】そこで、本実施形態のレーザ超音波装置では、ファブリ・ペロー共振器10Aにバルク材、例えば石英カラスの周面に反射膜を成膜したものなどを用いることにより、熱的・圧力的な変化の少ないファブリ・ペロー共振器を作り出すことで、もともとの偏差量を小さく抑制するものである。

【0125】また、ファブリ・ペロー共振器10を構成する2枚のミラーの反射率もファブリ・ペロー共振器1

0の透過性能に大きく影響するが、本実施形態のファブリ・ペロー共振器10Aでは共振面は外界と遮断されているので、ダストの付着や異物による反射面の損傷を防ぎ、反射率の設計値からの変化を小さくすることが可能となる。

【0126】この場合、機械振動などの外乱も受け難い構成であるが、その他の要因による若干の影響による共振長変化を補正するためには、ファブリ・ペロー共振器10Aを駆動機構である回転ステージ45上に設置し、この回転ステージ45を光検出器20の出力信号レベルを一定に保持するように制御器15で制御して駆動させればよい。つまり、制御器15は、ファブリ・ペロー共振器10Aの光軸に対する傾きを調整するために回転ステージ45を制御する。

【0127】このように本実施形態によれば、ファブリ・ペロー共振器10Aを、共焦点形状でかつ対向する面に所定の反射率を有する反射面を有し、熱的に安定であり、しかも計測光PLに対して透明と考え得る媒質で構成したことにより、前記第4実施形態と同様の効果が得られる。

【0128】〔第7実施形態〕図16は本発明に係るレーザ超音波装置の第7実施形態を示すブロック構成図である。

【0129】図16に示すように、本実施形態では、レーザ光ELによって励起された超音波を、レーザ光RLを用いて安定に制御したファブリ・ペロー共振器10に、被検査材4上の計測点からの反射光である計測光PLを入射することによって計測する基本的な動作は、前記第1実施形態と同様である。

【0130】本実施形態では、レーザ光MLを発振する第2のレーザ光源としてのレーザ光源45が波長可変レーザ光源であり、参照光RLの信号レベルを検出した光検出器20の出力信号に基づいて制御手段46によってレーザ光源45の発振波長を制御するものである。

【0131】ところで、図37に示すように通常のレーザ超音波装置では、機械的な振動や周辺温度変化による共振器長 $r$ の変化を、ファブリ・ペロー共振器10を構成するミラー10a、10bの片方(図では10b)にピエゾ素子などの駆動手段16を設置し、この駆動手段16によりミラー10bを光軸と平行に、変化を相殺する距離だけ微動することで、共振器長 $r$ が一定値となるように調整するようにしている。しかし、ピエゾ素子などによる機械的な調整手段は、機器の耐久性や周辺環境から混入するダストなどの噛み込みによって駆動が妨げられる恐れがあるという問題があった。

【0132】そこで、本実施形態のレーザ超音波装置では、共振器長 $r$ の変化に計測用レーザ光MLの発振波長を直接合わせ込むことにより、共振器の揺らぎを光学的に補償するようにしている。

【0133】ファブリ・ペロー共振器10の共振器長を

走査した場合の透過光量特性を表した図35と、ファブリ・ペロー共振器10に入射する計測光の波長を走査した場合の透過光量特性を表した図36の曲線を比較すれば明かなように、共振器長 $r$ を機械的に調整するのと入射光の波長(周波数)を調整するのとは等価な意味をもつ。

【0134】そこで、本実施形態では、参照光RLの透過光量レベルを光検出器20でモニタし、そのレベル変化を相殺するように制御手段46を用いて波長可変のレーザ光源45の発振波長を変化させれば、ファブリ・ペロー共振器10の共振器長を機械的に制御することなく、超音波信号を計測することが可能となる。なお、波長可変のレーザ光源45としては、波長可変レーザダイオードなどを使用することができる。

【0135】このように本実施形態によれば、レーザ光源が波長可変のレーザ光源45であって、光検出器20の出力信号レベルからレーザ光源45の発振波長を制御手段46により制御することにより、前記第4実施形態と同様の効果が得られる。

【0136】〔第7実施形態の変形例〕図17は本発明に係るレーザ超音波装置の第7実施形態の変形例を示すブロック構成図である。

【0137】この変形例は、前記第7実施形態を図38に示す簡易型のレーザ超音波装置に適用したものであり、この変形例では、超音波信号の受信による高速な信号レベル変化に波長制御が追従しないように制御手段46の時定数は、超音波信号の周波数および持続時間よりも十分遅く設定しておく必要がある。

【0138】〔第8実施形態〕図18は本発明に係るレーザ超音波装置の第8実施形態を示すブロック構成図である。

【0139】図18に示すように、本実施形態では、上記レーザ超音波装置の動作を制御手段46によって発振波長が制御される波長可変のレーザ光源45ではなく、レーザ光源5の発振光MLを発振器47で駆動される光周波数シフタ(可変周波数シフタ)48で波長制御する構成とすることも可能である。ここで、発振器47の発振周波数は、参照光RLの透過光量レベルをモニタする光検出器20の出力信号のレベル変化を相殺するように制御手段49によって制御される。

【0140】このように本実施形態によれば、光検出器20の出力信号レベルが一定となるようにレーザ光源5の発振光の光路上に、その周波数をシフトするための光周波数シフタ48を配置したことにより、前記第4実施形態と同様の効果が得られる。

【0141】〔第8実施形態の変形例〕図19は本発明に係るレーザ超音波装置の第8実施形態の変形例を示すブロック構成図である。

【0142】この変形例は、前記第8実施形態を図38に示す簡易型のレーザ超音波装置に適用したものであ

り、この変形例では、超音波信号の受信による高速な信号レベル変化に波長制御が追従しないように制御手段46の時定数は、超音波信号の周波数および持続時間よりも十分遅く設定しておく必要がある。

【0143】〔第9実施形態〕図20は本発明に係るレーザ超音波装置の第9実施形態を示すブロック構成図である。

【0144】図20に示すように、本実施形態では、レーザ光ELによって励起された超音波を、レーザ光RLを用いて安定に制御したファブリ・ペロー共振器10に、被検査材4上の計測点からの反射光である計測光PLを入射することによって計測する動作は、前記第1実施形態と同様である。

【0145】本実施形態では、ファブリ・ペロー共振器10の共振器長を、信号発振器50を用いてその片方のミラー10bに取り付けた駆動手段16によって強制的にレーザ光MLの1波長以上の距離に亘って加振し、その際に必ず通過する最大感度のタイミングに超音波信号の計測を行うことにある。

【0146】ところで、図37に示すように通常のレーザ超音波装置では、機械的な振動や周辺温度変化による共振器長 $r$ の変化を、ファブリ・ペロー共振器10を構成するミラー10a、10bの片方（図では10b）にピエゾ素子などの駆動手段16を設置し、この駆動手段16によりミラー10bを光軸と平行に、変化を相殺する距離だけ微動させることにより、共振器長 $r$ が一定値となるように調整するものである。しかし、この制御は計測光PLの波長に比べても十分に短い長さの制御であり、外乱の状況によっては制御が安定せず、また一度動作点から外れると、自動的に復帰することが難しいことなどの問題がある。

【0147】そこで、本実施形態のレーザ超音波装置では、共振器長 $r$ をピエゾ素子を用いて強制的に走査し、この走査に伴って必ず通過する最大感度領域において超音波送信用のパルスレーザ光の発振と超音波信号の検出を行うことで、共振器長の微妙な制御をすることなく、計測を行うことを可能にしたものである。

【0148】次に、本実施形態のレーザ超音波装置の動作を図21を参照して説明する。

【0149】まず、信号発振器50からは、図21(A)に示すような正弦波状等の信号 $V_{osc}$ を発振させ、これによってピエゾ素子などの駆動機構16を駆動させる。この際、信号の周期はパルスレーザ光源1の最大繰り返し周期および観察すべき超音波現象の持続時間よりも十分長く設定することが必要である。

【0150】また、その振幅は駆動機構16がミラー10bを光軸に沿ってレーザ光MLの1波長に相当する距離以上動作するのに必要な電圧とすべきである。ここでは簡単のため、駆動機構16の動作範囲が1波長以上2波長以下の場合を考える。この際、駆動機構16の応答

時間が $V_{osc}$ の周期よりも十分早ければ、共振器の間隔 $r$ は図21(B)に示すように $V_{osc}$ に追従して変化する。この時、図35の説明から明らかなように、超音波信号が存在しなければ光検出器12の出力信号 $i_{none}$ は図21(C)に示すように共振器長 $r$ が $n\lambda$ となる時刻でピークを持ち、共振器の動作に従ってそれを繰り返す曲線となる。

【0151】そこで、予め共振器が超音波信号 $U_{sig}$ を計測可能な状態となるタイミング、すなわち図の $\tau_M$ の範囲となる発振電圧値を求めておき、その電圧値に至る直前にパルスレーザ光源1を発振させるためのトリガー信号 $Trg$ を信号発振器50からレーザ光源1に供給すれば、必ず共振器が超音波信号 $U_{sig}$ を計測可能な状態となるタイミングで超音波信号を計測することが可能となる。

【0152】この場合、光検出器12の出力信号 $I_{sig}$ は図21(E)に示すように共振器長の走査による直流成分に超音波信号 $U_{sig}$ が重畳したような波形となるが、 $V_{osc}$ の周期が観察時間に比べて十分遅ければ、その直流成分はほぼ無視し得るし、仮に直流成分が無視できない場合には信号処理装置13で適切なハイパスフィルタを通すことで通常の信号を得ることが可能となる。

【0153】このように本実施形態によれば、レーザ光源1がパルス発振光源であって、周期的な信号を発振するための信号発振器50と、この信号発振器50の出力信号に応じてレーザ光源5の1波長以上の長さだけファブリ・ペロー共振器10のミラー10bを光軸に平行に直線的に動作させ、信号発振器50の出力信号に同期してレーザ光源1を発振させるようにしたことにより、ファブリ・ペロー共振器10の制御を不要とし、連続的な振動環境や温度変化がある環境において使用可能となる。

【0154】〔第10実施形態〕図22は本発明に係るレーザ超音波装置の第10実施形態を示すブロック構成図である。

【0155】前記第9実施形態において、外乱などが著しく激しい場合には、信号発振器の出力値 $V_{osc}$ と共振器長 $r$ の動作が一意に決まらない場合も有り得る。

【0156】そこで、本実施形態のレーザ超音波装置は、図22に示すようにレーザ超音波装置の基本構成は図36に示した参照光RLを用いる構成と同じであり、信号発振器51で駆動させた駆動機構16により共振器長を強制的に走査するのは、前記第9実施形態の装置と同様である。このようにすれば、光検出器20においては常に図23(C)に示すような信号 $i_{ref}$ を検出することができる。

【0157】そこで、信号発振器51の信号 $V_{osc}$ の適当なレベルではなく、信号 $i_{ref}$ の適当な値にトリガーレベルを設定し、その信号を発振制御手段としての

信号発振器 52 でレーザ光源 1 に供給すれば、より確実に共振器が超音波信号  $U_{sig}$  を計測可能な状態となるタイミングで超音波信号を計測することが可能となる。

【0158】この場合、前記第 9 実施形態の構成では、計測タイミングを設定するのが難しい信号  $V_{osc}$  の下り勾配での最適タイミングにも計測時間  $\tau_M$  を設定することが可能となり、超音波の検出頻度を増加させることも可能となる。この場合、光検出器 12 の出力信号  $i_{sig}$  は図 23 (E) に示すように共振器長の走査による低周波数成分に超音波信号  $U_{sig}$  が重畳したような波形となるが、信号  $V_{osc}$  の周期が観察時間に比べて十分遅ければ、その成分はほぼ無視し得るし、仮に無視できない場合には信号処理装置 13 で適切なハイパスフィルタに通すことで通常の信号を得ることが可能となる。さらに、信号  $i_{sig}$  を適切なゲインで増幅・減衰させた信号  $i_{ref}$  で電氣的に割算をすることで、この影響だけでなく、例えば光源の出力揺らぎなどの影響も相殺することができる。

【0159】このように本実施形態によれば、信号発振器 51 により駆動した駆動機構 16 で共振器長を強制的に走査し、光検出器 20 の出力信号  $i_{ref}$  の適当な値にトリガーレベルを設定し、その信号を信号発振器 52 でレーザ光源 1 に供給することにより、前記第 9 実施形態と同様の効果が得られる。

【0160】〔第 11 実施形態〕図 24 は本発明に係るレーザ超音波装置の第 11 実施形態を示すブロック構成図である。

【0161】この第 11 実施形態のレーザ超音波装置は、前記第 10 実施形態の装置構成を基本としてさらに高感度な計測を行うためのものであり、その基本構成は図 37 に示した参照光 RL を用いる構成と同様であり、信号発振器 51 により駆動した駆動機構 16 で共振器長を強制的に走査し、光検出器 20 の出力信号  $i_{ref}$  の適当な値にトリガーレベルを設定し、その信号を信号発振器 53 でレーザ光源 1 に供給することで、より確実に共振器が超音波信号  $U_{sig}$  を計測可能な状態となるタイミングで超音波信号を計測することが可能となる構成は、前記第 10 実施形態の装置と同様である。

【0162】本実施形態では、レーザ光源 54 から発振されたレーザ光 ML を、参照光 RL と計測光 PL とに分岐した後、光増幅器 55 に入射し、計測光 PL の光量  $I_M$  を計測時間  $\tau_M$  だけ高出力化することにある。ここで、図 25 に示したように光増幅器 55 の動作タイミングを出力信号  $i_{ref}$  あるいはレーザ光源 1 の発振タイミングから適切な遅延を持たせて同期させることで、常に共振器が超音波信号  $U_{sig}$  を計測可能な状態となるタイミングにおいて、大光量をもって超音波信号を計測することができる。この場合も光検出器 12 の出力信号  $i_{sig}$  は図 25 (E) に示すように共振器長の走査による低周波数成分に超音波信号  $U_{sig}$  が重畳したよう

な波形となるが、信号  $V_{osc}$  の周期が観察時間に比べて十分遅ければ、その成分はほぼ無視し得るし、仮に無視できない場合には信号処理装置 13 で適切なハイパスフィルタを通すことで通常の信号を得ることが可能となる。さらに、出力信号  $i_{sig}$  を適切なゲインで増幅・減衰させた出力信号  $i_{ref}$  で電氣的に割算することで、この影響だけでなく例えば光源の出力揺らぎなどの影響も相殺することができる。

【0163】なお、本実施形態において、光増幅器 55 の後段に高調波発生用の光学素子 56 を挿入しておけば、ファブリ・ペロー共振器 10 の共振器長を制御するための参照光 RL の波長、例えば YAG レーザの基本波長 1,064 nm と、計測光 PL の波長、例えば YAG レーザの第 2 高調波波長 532 nm とを別波長としつつ安定して制御することができ、参照光 RL が偏光ビームスプリッタ 19 で反射される際の漏れ透過光が光検出器 12 に混入するのを、図示しない波長フィルタで防止することも可能となる。

【0164】このように本実施形態によれば、出力光の強度を検出した光検出器 12 の適切な一つの信号レベルが所定の状態にある場合にレーザ光源 1 を発振させ、かつレーザ光源 1 が発振した時刻から所定の時刻遅れをもって光増幅器 55 を動作させることにより、前記第 9 実施形態と同様の効果が得られる。

【0165】〔第 12 実施形態〕図 26 は本発明に係るレーザ超音波装置の第 12 実施形態を示すブロック構成図である。

【0166】この第 12 実施形態は、前記第 10 実施形態の装置構成を基本としてさらに高感度な計測を行うためのものであり、レーザ光源 1 の発振タイミングに合わせて、感度調整手段である信号発振器 52 により前記第 1 実施形態に記載した光検出器 12 に印加する逆バイアス電圧  $V_B$  を図 27 (F) に示すように制御して感度を調整するものであり、このようにすれば、常に共振器が超音波信号  $U_{sig}$  を計測可能な状態となるタイミングにおいて、光検出器 12 の最大感度状態で超音波信号を計測することができる。

【0167】この場合も、光検出器 12 の出力信号  $i_{sig}$  は図 27 (E) に示すように共振器長の走査による低周波数成分に超音波信号  $U_{sig}$  が重畳したような波形となるが、信号  $V_{osc}$  の周期が観察時間に比べて十分遅ければ、その成分はほぼ無視し得るし、仮に無視できない場合には信号処理装置 13 で適切なハイパスフィルタを通すことで通常の信号を得ることが可能となる。

【0168】さらに、 $i_{sig}$  を適切なゲインで増幅・減衰させた  $i_{ref}$  で電氣的に割算することで、この影響だけでなく例えば光源の出力揺らぎなどの影響も相殺することができる。このように本実施形態によれば、前記第 9 実施形態と同様の効果が得られる。

【0169】〔第13実施形態〕図28は本発明に係るレーザ超音波装置の第13実施形態を示すブロック構成図である。

【0170】図28に示すように、本実施形態では、レーザ光ELによって励起された超音波を、レーザ光RLを用いて安定に制御したファブリ・ペロー共振器10に、被検査材4上の計測点からの反射光である計測光PLを入射することによって計測する動作は、前記第1実施形態と同様である。

【0171】本実施形態は、ファブリ・ペロー共振器10の共振器長を制御するのではなく、波長可変のレーザ光源57からの発振波長を掃引し、その際に必ず通過する最大感度のタイミングに超音波信号の計測を行うことにある。

【0172】ところで、図37に示すように通常のレーザ超音波装置では、機械的な振動や周辺温度変化による共振器長 $r$ の変化を、ファブリ・ペロー共振器10を構成するミラー10a、10bの片方(図では10b)にピエゾ素子などの駆動手段16を設置し、この駆動手段16によりミラー10bを光軸と平行に、変化を相殺する距離だけ微動させることにより、共振器長 $r$ が一定値となるように調整するものである。しかし、この制御は計測光PLの波長に比べても十分に短い長さの制御であり、外乱の状況によっては制御が安定せず、また一度動作点から外れると、自動的に復帰することが難しいことなどの問題がある。

【0173】そこで、本実施形態のレーザ超音波装置では、共振器長 $r$ を固定し、波長可変のレーザ光源57の発振波長を時間的に掃引して、その掃引に伴って必ず通過する最大感度領域において発振制御手段としての信号発振器53からの超音波送信用のパルスレーザ光の発振と超音波信号の検出を行うことで、共振器長の微妙な制御を行うことなしに、計測を行うことを可能にするものである。

【0174】次に、本実施形態のレーザ超音波装置の動作を図29を参照して説明する。

【0175】まず、波長可変のレーザ光源57の発振波長 $\lambda$ を図29(H)に示すように正弦波状に掃引する。この際、掃引周期はパルスレーザ光源1の最大繰り返し周期および観察すべき超音波現象の持続時間よりも十分長く設定することが必要である。波長掃引と共振器長の走査は、相対的に同じ効果であるため、図23で説明したのと同じ効果が光検出器20の出力信号 $i_{ref}$ に現れる。

【0176】したがって、出力信号 $i_{ref}$ の適切なレベルに設定したトリガーレベルでレーザ光源1を発振させ、光検出器12の出力信号 $i_{sig}$ を観察すれば、常に共振器と計測光波長のマッチングがとれた状態で超音波信号 $U_{sig}$ を観察することが可能となる。

【0177】この場合、光検出器12の出力信号 $i$

$i_{sig}$ は図29(E)に示すように発振波長の掃引による低周波数成分に超音波信号 $U_{sig}$ が重畳したような波形となるが、 $\lambda$ の掃引周期が観察時間に比べて十分遅ければ、その成分はほぼ無視し得るし、仮に無視できない場合には信号処理装置13で適切なハイパスフィルタを通すことで通常の信号を得ることが可能となる。さらに、信号 $i_{sig}$ を適切なゲインで増幅・減衰させた信号 $i_{ref}$ で電氣的に割算することで、この影響だけでなく、例えば光源の出力揺らぎなどの影響も相殺することができる。

【0178】このように本実施形態によれば、共振器長 $r$ を固定し、波長可変のレーザ光源57の発振波長を時間的に掃引して、その掃引に伴って必ず通過する最大感度領域において超音波送信用のパルスレーザ光の発振と超音波信号の検出を行うことにより、前記第9実施形態と同様の効果が得られる。

【0179】〔第14実施形態〕図30は本発明に係るレーザ超音波装置の第14実施形態を示すブロック構成図である。

【0180】図30に示すように、本実施形態では、レーザ光ELによって励起された超音波を、被検査材4上の計測点からの反射光である計測光PLを、共振器長が走査されたファブリ・ペロー共振器10に入射し、高い検出感度が得られタイミングで計測する動作は、前記第9実施形態から前記第12実施形態記載のレーザ超音波装置と同様である。

【0181】本実施形態では、ファブリ・ペロー共振器10の制御を共振器長の走査で行うのではなく、ファブリ・ペロー共振器10を構成する2枚のミラー10a、10b間に挿入された正2n角形状(但し、 $n$ は2以上の整数)のレーザビーム透過部材58を回転駆動機構59により回転させることによって行うものである。レーザビーム透過部材58の正2n角形状は、必ず平行な対向面を有するので、図12における説明と同じ原理で、レーザビーム透過部材58を回転駆動機構59により回転させて光軸と面とのなす角度を変化させれば、共振器長を走査するのと同様の効果が得られる。

【0182】本実施形態では、ピエゾ素子などの駆動機構16で比較的重いミラーを直線的に振動させるのに比べ、回転動作で同じ効果が得られるので、例えば高速に共振器長を走査したい場合などに有効である。

【0183】このように本実施形態によれば、レーザビーム透過部材58を回転駆動機構59により回転させて光軸と面とのなす角度を変化させてファブリ・ペロー共振器10を制御することにより、高速に共振器長を走査することができる。

【0184】〔第15実施形態〕図31は本発明に係るレーザ超音波装置の第15実施形態を示すブロック構成図である。

【0185】図31に示すように、本実施形態では、レ

ーザ光ELによって励起された超音波を、被検査材4上の計測点からの反射光である計測光PLを、共振器長が走査されたファブリ・ペロー共振器10に入射し、高い検出感度が得られタイミングで計測する動作は、前記第9実施形態から前記第12実施形態記載のレーザ超音波装置と同様である。

【0186】本実施形態では、共振器長の走査に伴って観察される光検出器20の出力信号*i<sub>ref</sub>*の特徴量を抽出するための信号監視手段60と、この信号監視手段60で抽出された特徴量と予め設定しておいた基準値とを比較する比較手段61と、この比較手段61の結果を表示する表示手段62とを備え、この表示手段62の状態によってファブリ・ペロー共振器10あるいは装置全体の健全性を検知するようにしている。

【0187】次に、本実施形態のレーザ超音波装置の動作を図32を参照して説明する。

【0188】前記第9実施形態から前記第12実施形態記載のレーザ超音波装置の動作で説明した通り、例えばファブリ・ペロー共振器10のミラー10a、10bを図32(A)に示すように走査すると、光検出器20の出力信号レベルは図32(C)に示すように変化する。

【0189】しかしながら、例えば被検査材4の反射率が著しく低い場合、あるいはレーザ超音波装置上の一部の光学素子に位置ずれやダストの付着、あるいは損傷が発生した場合には、光検出器20の出力信号レベルは図32(C')に示すようになる。

【0190】そこで、予め健全な状態で、計測に必要な出力信号の特徴量、この場合はピーク高さ*i<sub>peak</sub>*を設定しておき、もしピーク高さがそれに届かない場合にはLEDランプなどの表示手段62が点灯するようにしておけば、計測中にレーザ超音波装置あるいは計測条件が計測に十分であるか否かを知ることが可能となる。

【0191】また、レーザ超音波装置あるいは計測条件の別の不健全性としては、ファブリ・ペロー共振器10のミスアライメントがある。これはミラー10aと10bとが正常に対向していないとか、あるいはミラー10aと10bとの間隔が、それらの焦点距離と一致していない場合などであり、その際には、光検出器20の出力信号は、図32(C')に示すようにピーク高さが減少する場合の他に、例えば図32(C'')に示すように非対称な波形形状となる場合がある。

【0192】このような現象を検知するためには、別の特徴量として、例えば波形の歪み量、周波数、トリガーレベルを横切る時間間隔、立ち上がり／立ち下がり時間の偏差、波形全体の積分値などを適宜選択すればよい。

【0193】このように本実施形態によれば、共振器長の走査に伴って観察される光検出器20の出力信号*i<sub>ref</sub>*の特徴量を信号監視手段60で抽出し、この抽出された特徴量と予め設定しておいた基準値とを比較手段61で比較し、この比較した結果を表示手段62に表示

することにより、ファブリ・ペロー共振器10あるいは装置全体の健全性を検知することができる。

【0194】[第16実施形態] 図33は本発明に係るレーザ超音波装置の第16実施形態を示すブロック構成図である。

【0195】図33に示すように、本実施形態では、レーザ光ELによって励起された超音波を、被検査材4上の計測点からの反射光である計測光PLを、共振器長が走査されたファブリ・ペロー共振器10に入射し、高い検出感度が得られタイミングで計測する動作は、前記第9実施形態から前記第12実施形態記載のレーザ超音波装置と同様である。

【0196】本実施形態では、共振器長の走査に伴って観察される光検出器20の出力信号*i<sub>ref</sub>*の特徴量を抽出するための信号監視手段60と、ファブリ・ペロー共振器10を構成するミラー（この場合10a）の2次元的な傾きを調整する調整機構63と、信号監視手段60で抽出された特徴量と予め設定しておいた基準値とを比較し、その偏差を補正するように調整機構63に駆動信号を入力するための調整制御手段64とを備えて構成され、ファブリ・ペロー共振器10の健全性が劣化してきた場合にその粗調整を自動的に行うようにしている。

【0197】次に、本実施形態のレーザ超音波装置の動作を説明する。

【0198】前記第15実施形態のレーザ超音波装置の動作で説明した通り、ファブリ・ペロー共振器10の状態が劣化すると光検出器20の出力信号*i<sub>ref</sub>*にはピーク高さの減少、あるいは波形歪みなどの傾向が見られる。例えば、微小な機械振動や熱的な歪みであれば、これは駆動機構16によって自動的に補償されるが、例えば駆動手段16の動作範囲を逸脱するような大きな位置ずれが発生したり、あるいはねじれ方向の位置ずれが発生した場合には駆動手段16でそれを補償するのは不可能である。

【0199】そこで、本実施形態では、光検出器20の出力信号*i<sub>ref</sub>*の特徴量とその正常値とを調整制御手段64で比較し、適切な制御アルゴリズムをもってその偏差を解消するように駆動手段16を設置していないミラー10aに設置された調整機構63を動作させれば、不意に発生した大きなミスアライメントを補償することが可能となる。

【0200】なお、本実施形態では、出力信号*i<sub>ref</sub>*の特徴量とその正常値を調整制御手段42で比較した結果をもってファブリ・ペロー共振器10のミラー位置あるいはその他の光学素子を手動により適切に調整するようにしてもよい。

【0201】

【発明の効果】以上説明したように、本発明に係るレーザ超音波装置によれば、第1のレーザ光源の変調タイミングを基準とし、所定の時間遅れおよび所定の時間幅で



光検出手段の感度を調整させるための感度調整手段を設けたことにより、微弱な光強度信号を高感度で検出することができ、かつその中に含まれる微小な周波数シフトをノイズレベル以上の大きさに観測可能なレーザ超音波装置を提供することができる。

【0202】また、例えば高速な周辺外乱にも追従制御可能なレーザ超音波装置を提供することができる。さらに、例えば連続的な振動環境や温度変化がある環境において使用可能な、共振器の制御を必要としないレーザ超音波装置を提供することができる。そして例えば検査・計測現場に装置を設置した場合に、即座に共振器を調整可能で、しかも動作中にその状態の健全性を確認可能なレーザ超音波装置を提供することができる。これらにより、例えば運転中プラントの構造材や機器の検査に供することのできるレーザ超音波装置を実現することができる。

#### 【図面の簡単な説明】

【図1】本発明に係るレーザ超音波装置の第1実施形態を示すブロック構成図。

【図2】図1のレーザ超音波装置に用いられている光検出器を示す回路図。

【図3】第1実施形態のレーザ超音波装置の動作を示すタイミングチャート。

【図4】第1実施形態のレーザ超音波装置の他の動作を示すタイミングチャート。

【図5】本発明に係るレーザ超音波装置の第1実施形態の変形例を示すブロック構成図。

【図6】本発明に係るレーザ超音波装置の第2実施形態を示すブロック構成図。

【図7】光検出器の特性図。

【図8】本発明に係るレーザ超音波装置の第2実施形態の変形例を示すブロック構成図。

【図9】本発明に係るレーザ超音波装置の第3実施形態を示すブロック構成図。

【図10】第3実施形態のレーザ超音波装置の動作を示す説明図。

【図11】本発明に係るレーザ超音波装置の第4実施形態を示すブロック構成図。

【図12】(A)、(B)は第4実施形態の透過板の回転動作による光路長差を示す説明図。

【図13】本発明に係るレーザ超音波装置の第4実施形態の変形例を示すブロック構成図。

【図14】本発明に係るレーザ超音波装置の第5実施形態を示すブロック構成図。

【図15】本発明に係るレーザ超音波装置の第6実施形態を示すブロック構成図。

【図16】本発明に係るレーザ超音波装置の第7実施形態を示すブロック構成図。

【図17】本発明に係るレーザ超音波装置の第7実施形態の変形例を示すブロック構成図。

【図18】本発明に係るレーザ超音波装置の第8実施形態を示すブロック構成図。

【図19】本発明に係るレーザ超音波装置の第8実施形態の変形例を示すブロック構成図。

【図20】本発明に係るレーザ超音波装置の第9実施形態を示すブロック構成図。

【図21】第9実施形態のレーザ超音波装置の動作を示すタイミングチャート。

【図22】本発明に係るレーザ超音波装置の第10実施形態を示すブロック構成図。

【図23】第10実施形態のレーザ超音波装置の動作を示すタイミングチャート。

【図24】本発明に係るレーザ超音波装置の第11実施形態を示すブロック構成図。

【図25】第11実施形態のレーザ超音波装置の動作を示すタイミングチャート。

【図26】本発明に係るレーザ超音波装置の第12実施形態を示すブロック構成図。

【図27】第12実施形態のレーザ超音波装置の動作を示すタイミングチャート。

【図28】本発明に係るレーザ超音波装置の第13実施形態を示すブロック構成図。

【図29】第13実施形態のレーザ超音波装置の動作を示すタイミングチャート。

【図30】本発明に係るレーザ超音波装置の第14実施形態を示すブロック構成図。

【図31】本発明に係るレーザ超音波装置の第15実施形態を示すブロック構成図。

【図32】第15実施形態のレーザ超音波装置の動作を示すタイミングチャート。

【図33】本発明に係るレーザ超音波装置の第16実施形態を示すブロック構成図。

【図34】第1の従来例に係るレーザ超音波装置を示すブロック構成図。

【図35】ファブリ・ペロー共振器の動作を示す説明図。

【図36】ファブリ・ペロー共振器の動作を示す説明図。

【図37】第2の従来例に係るレーザ超音波装置を示すブロック構成図。

【図38】第3の従来例に係るレーザ超音波装置を示すブロック構成図。

【図39】各従来例のレーザ超音波装置に用いられている光検出器を示す回路図。

【図40】従来のレーザ超音波装置の動作を示すタイミングチャート。

#### 【符号の説明】

1 レーザ光源 (第1のレーザ光源)

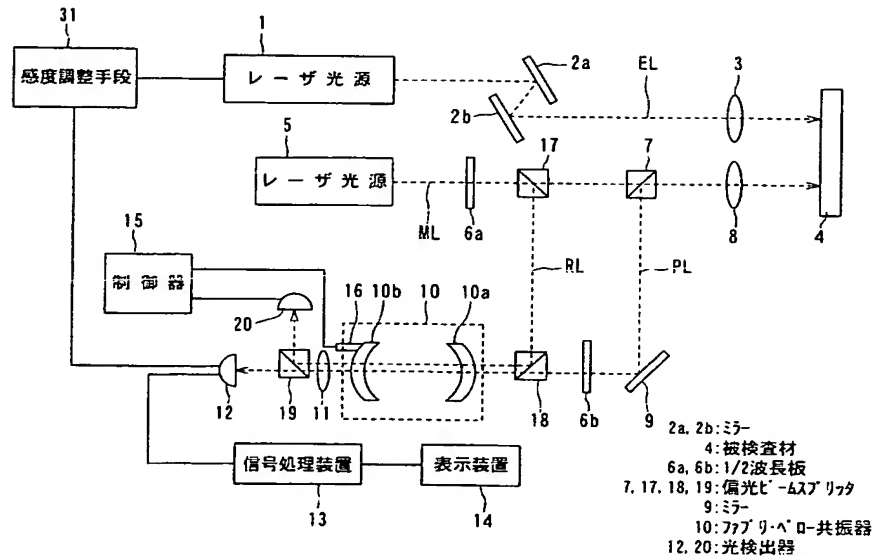
2 a, 2 b ミラー

3 レンズ

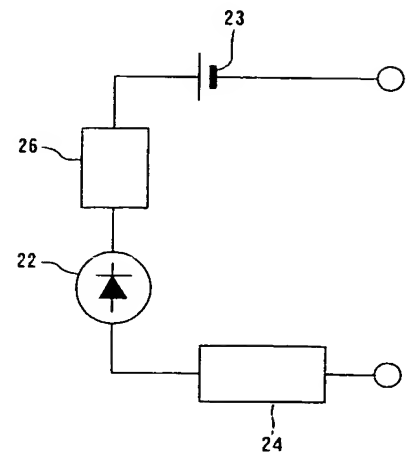
4 被検査材  
 5 レーザ光源 (第2のレーザ光源)  
 6 a, 6 b 1/2波長板  
 7 偏光ビームスプリッタ (第1の光分岐手段)  
 8 レンズ  
 9 ミラー  
 10 ファブリ・ペロー共振器  
 10 A ファブリ・ペロー共振器  
 10 a, 10 b ミラー  
 11 レンズ  
 12 光検出器 (光検出手段)  
 13 信号処理装置  
 14 表示装置  
 15 制御器 (共振器長制御手段)  
 16 駆動機構  
 17 偏光ビームスプリッタ  
 18 偏光ビームスプリッタ  
 19 偏光ビームスプリッタ (第2の光分岐手段)  
 20 光検出器 (別の光検出手段)  
 22 光検出素子  
 23 直流電源  
 24 負荷  
 26 スイッチ  
 31 感度調整手段  
 37 光量調整手段  
 38 光減衰器

39 発振器  
 40 光変調器  
 41 回転ステージ  
 42 透過板 (共振長調整手段)  
 44 密閉容器  
 45 レーザ光源 (第2のレーザ光源)  
 46 制御手段  
 47 発振器  
 48 光周波数シフタ (可変周波数シフタ)  
 49 制御手段  
 50 信号発振器  
 51 信号発振器  
 52 信号発振器  
 53 信号発振器  
 54 レーザ光源  
 55 光増幅器  
 56 光学素子  
 57 レーザ光源  
 58 レーザビーム透過部材  
 59 回転駆動機構  
 60 信号監視手段  
 61 比較手段  
 62 表示手段  
 63 調整手段  
 64 調整制御手段

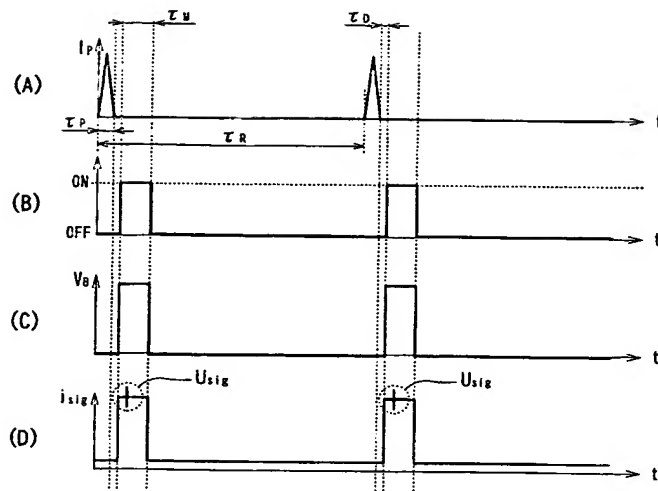
【図1】



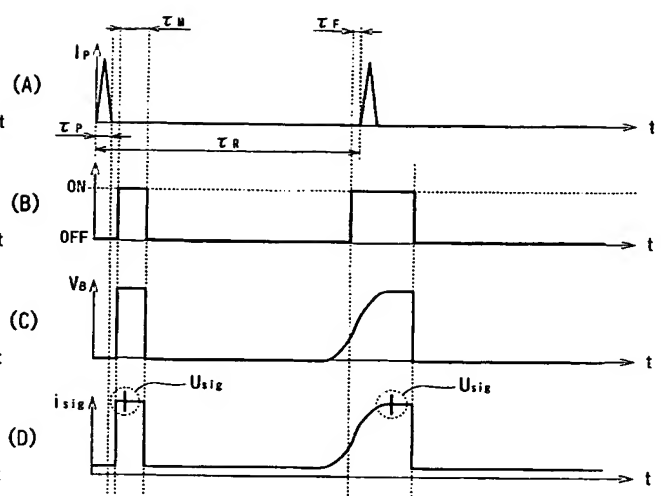
【図2】



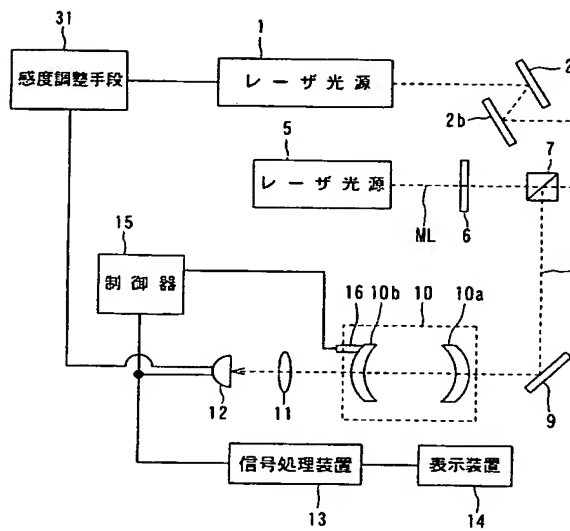
【図 3】



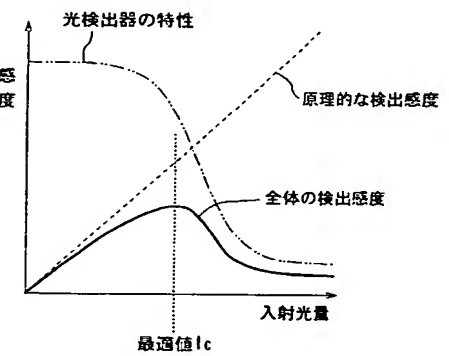
【図 4】



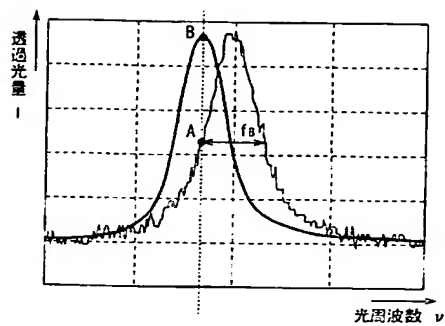
【図 5】



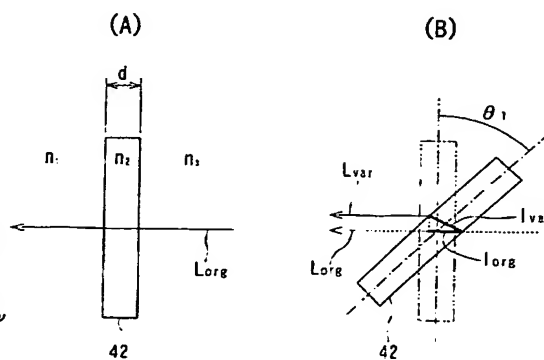
【図 7】



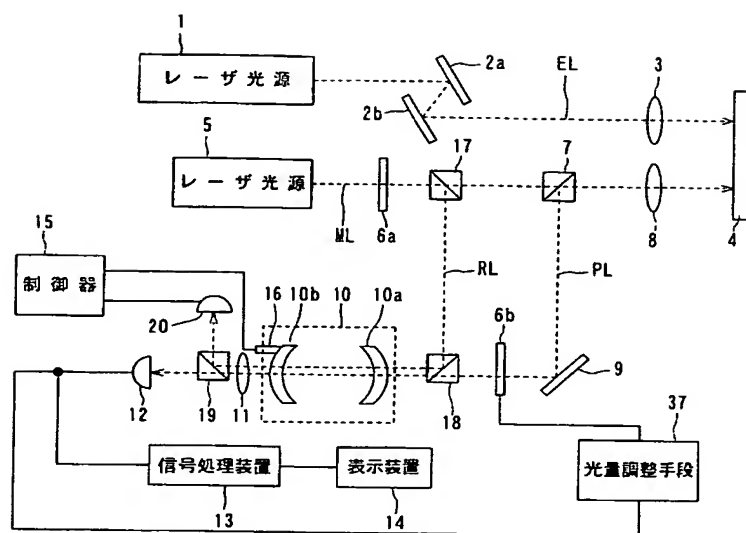
【図 10】



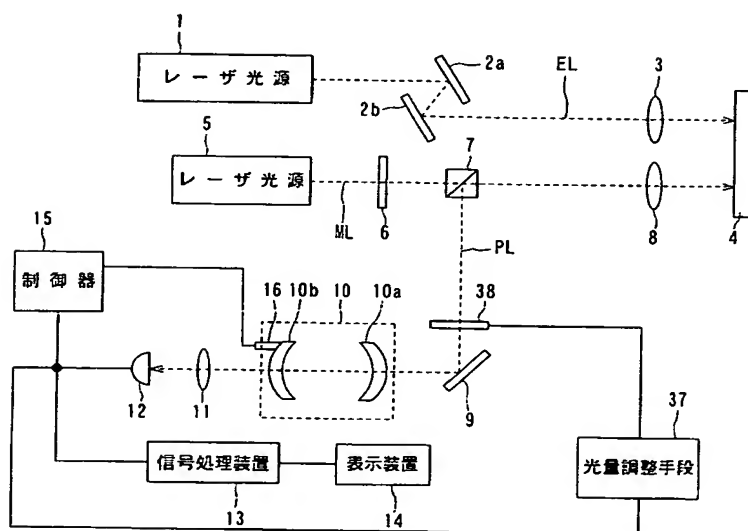
【図 12】



【図 6】



【図 8】



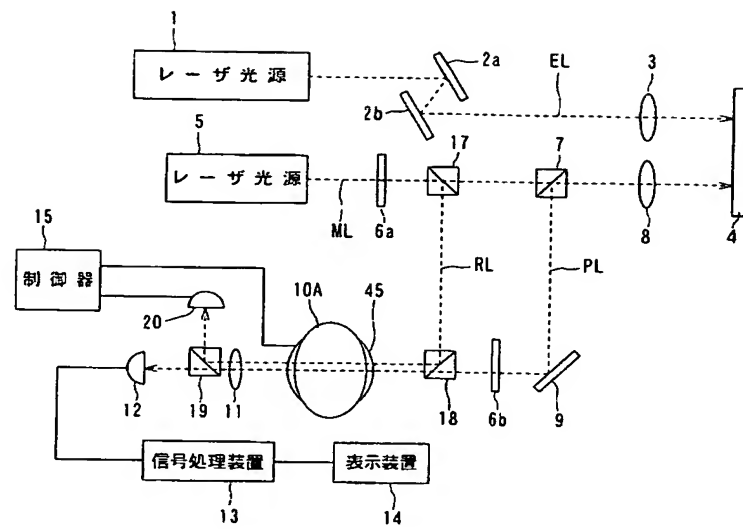
[illegible]

The diagram illustrates a laser light measurement system. It features two laser sources, labeled 1 and 5, both emitting 'レーザー光源' (Laser Light Source). The light from source 1 is directed by mirror 2a towards lens 3. The light from source 5 passes through a half-wave plate (6) and is split by beam splitter 7. One path from beam splitter 7 goes through lens 8 to detector 4. The other path from beam splitter 7 is reflected by mirror 9 and enters a polarizing prism (10). Inside the prism, the light is split into two components, 10a and 10b, which pass through wave plates 41 and 42 respectively. These components are then detected by photodetector 12. The photodetector is connected to a control unit (15), which in turn is connected to a signal processing unit (13) and a display unit (14). The light paths are labeled EL (Emission Light) and PL (Polarization Light).

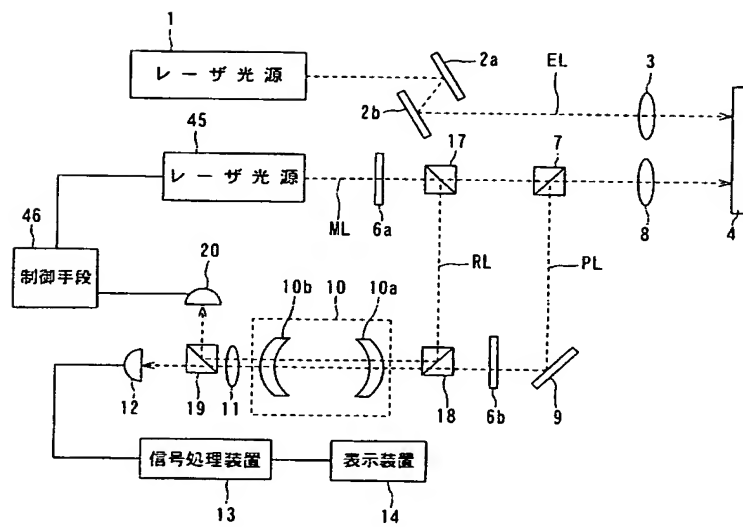
The diagram illustrates a laser light beam scanning system. It features two laser sources, labeled 1 and 5, both emitting beams labeled 'レーザー光源' (Laser Source). The system is controlled by a '制御器' (Controller) 15, which is connected to a '信号処理装置' (Signal Processing Device) 13 and a '表示装置' (Display Device) 14. The optical paths are indicated by dashed lines. Light from source 1 is reflected by mirrors 2a and 2b, passing through lens 3 and component 4. Light from source 5 passes through lens 6a, a beam splitter 17, and component 7. Both paths converge at a central unit 10, which contains components 10a, 10b, 10c, and 10d. The light then passes through lens 6b, a beam splitter 18, and component 9. The system also includes a lens 8 and a component 7. The entire system is managed by the controller 15, which is connected to the signal processing device 13 and the display device 14.



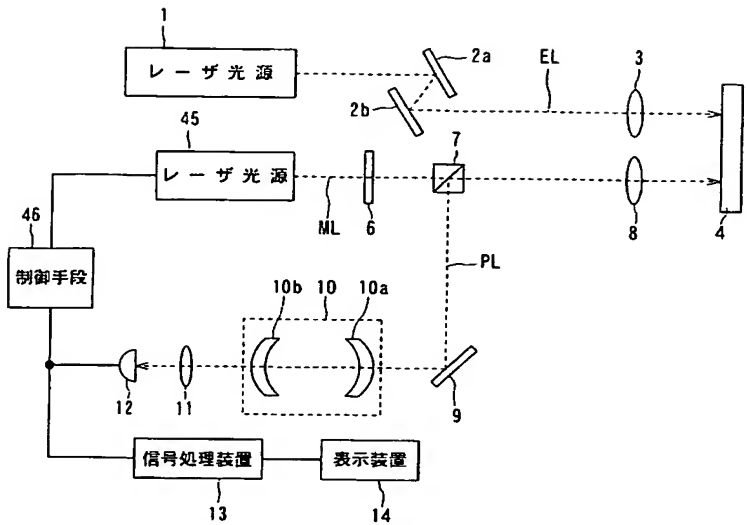
【図 15】



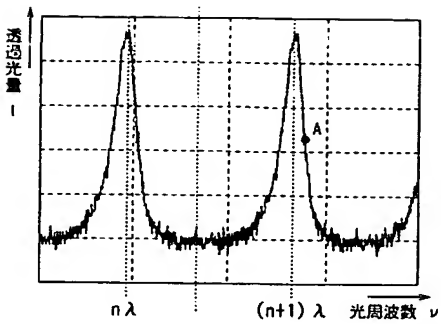
【図 16】



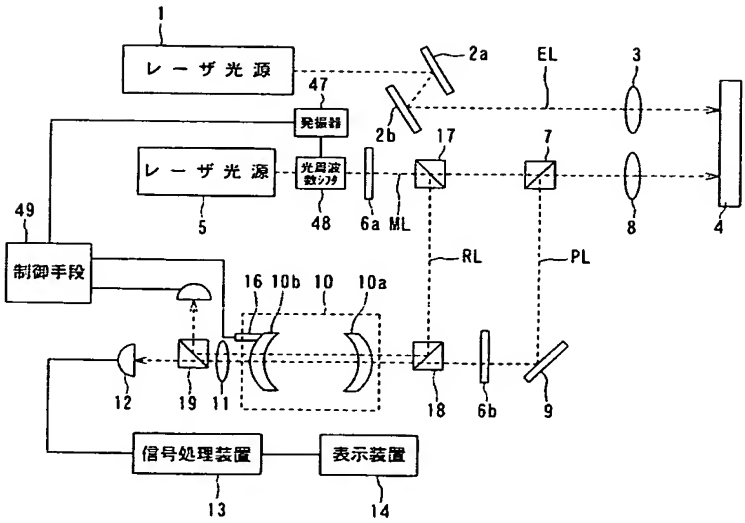
【図 17】



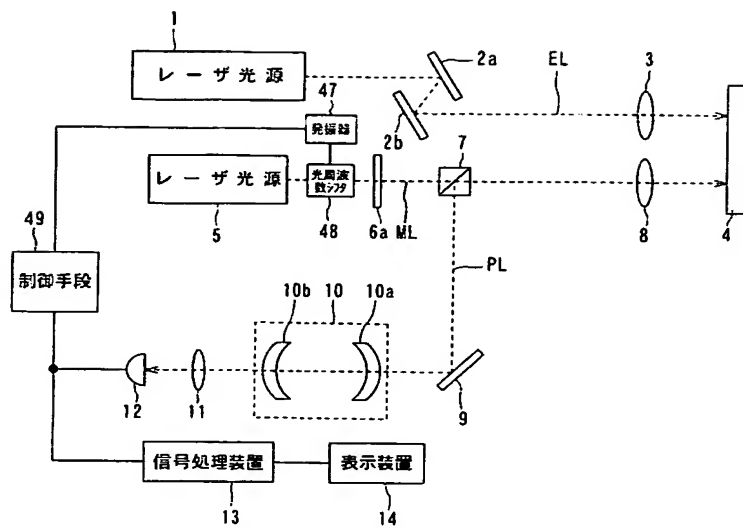
【図 35】



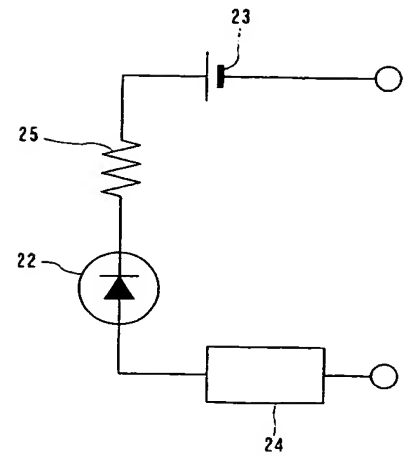
【図 18】



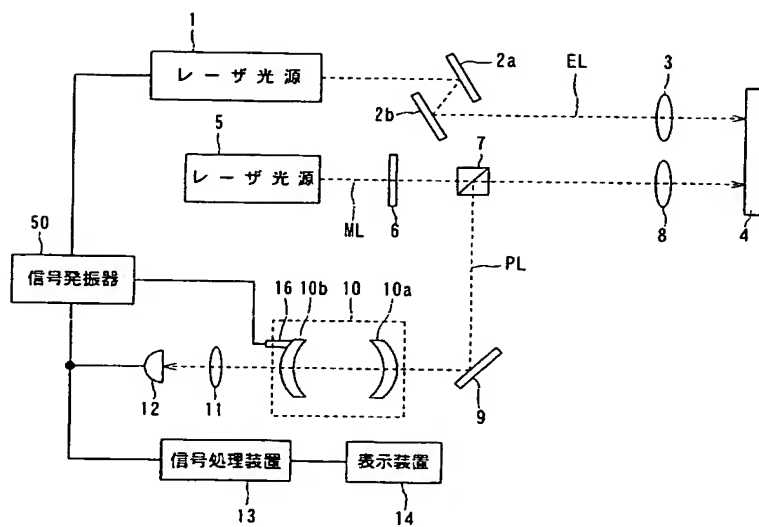
【図19】



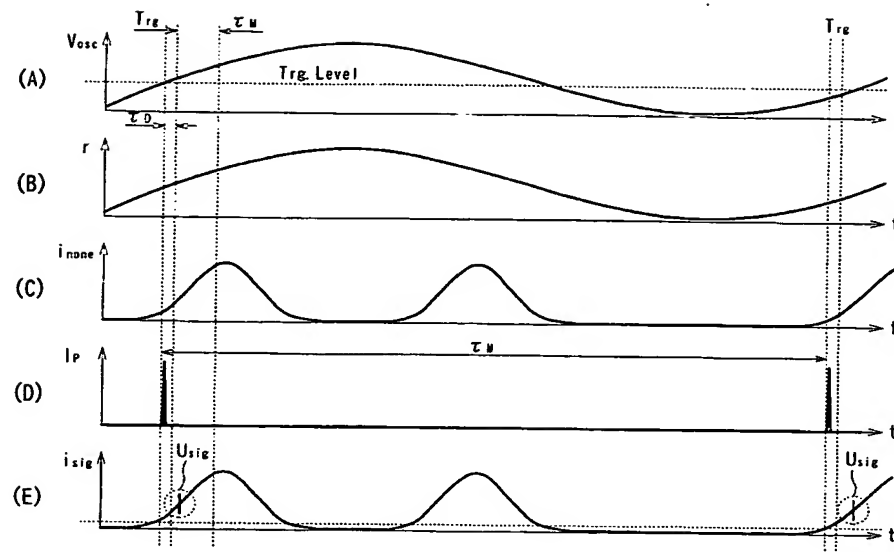
【図39】



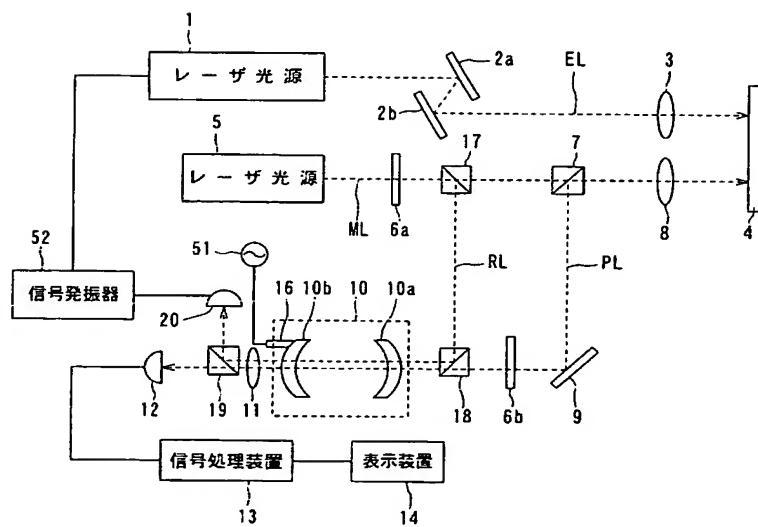
【図20】



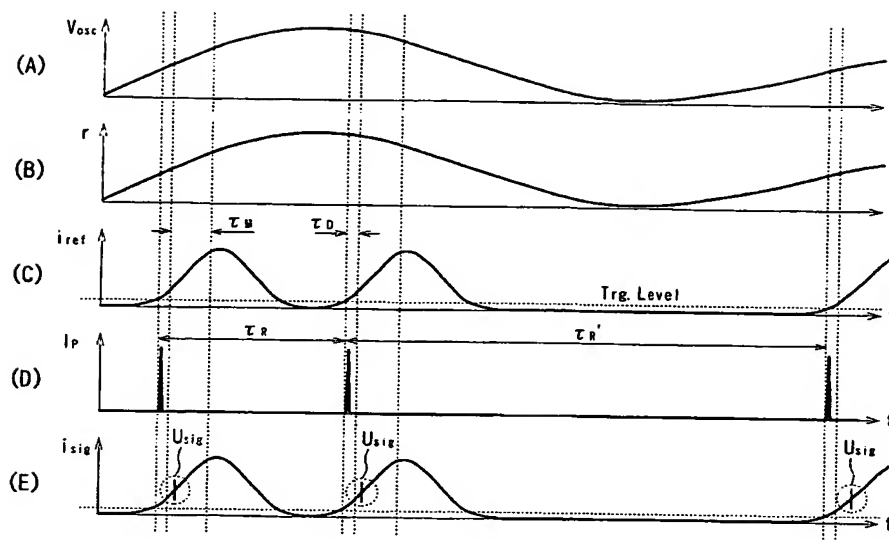
【図 21】



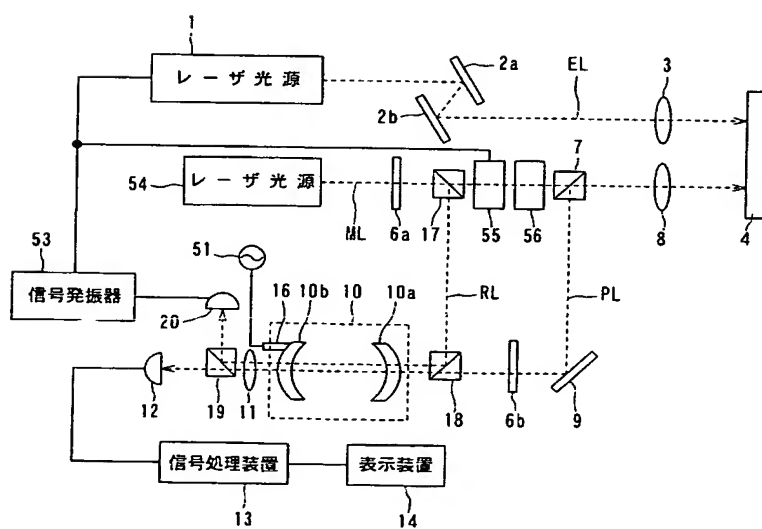
【図 22】



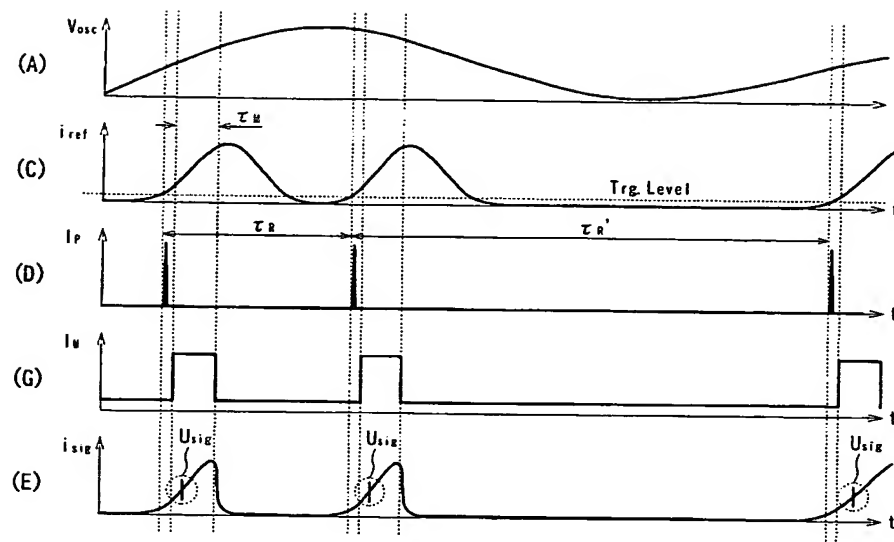
【图 2 3】



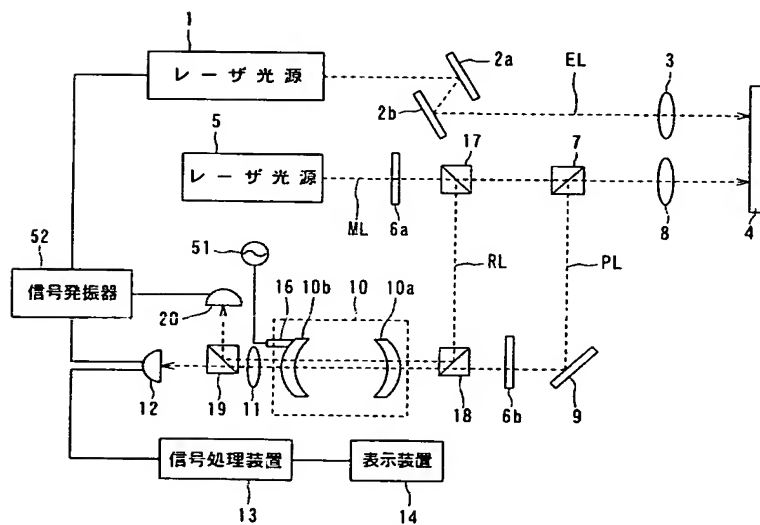
【図 24】



【図 25】

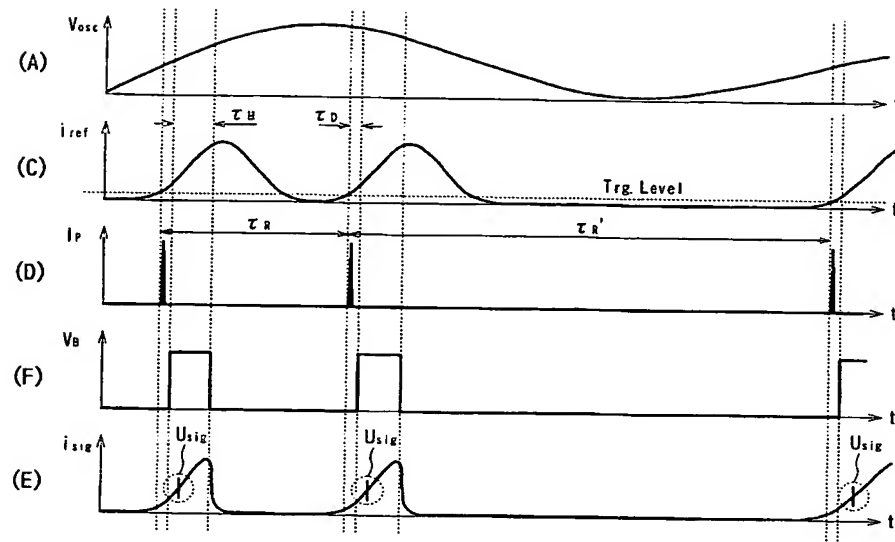


【図 26】

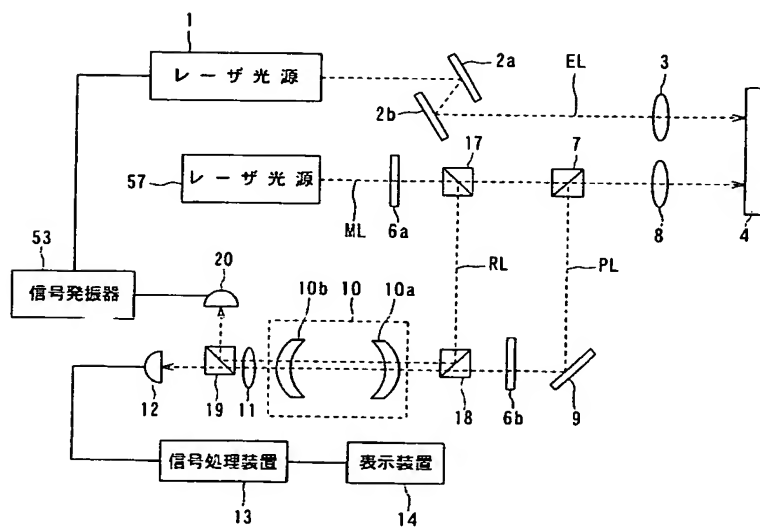




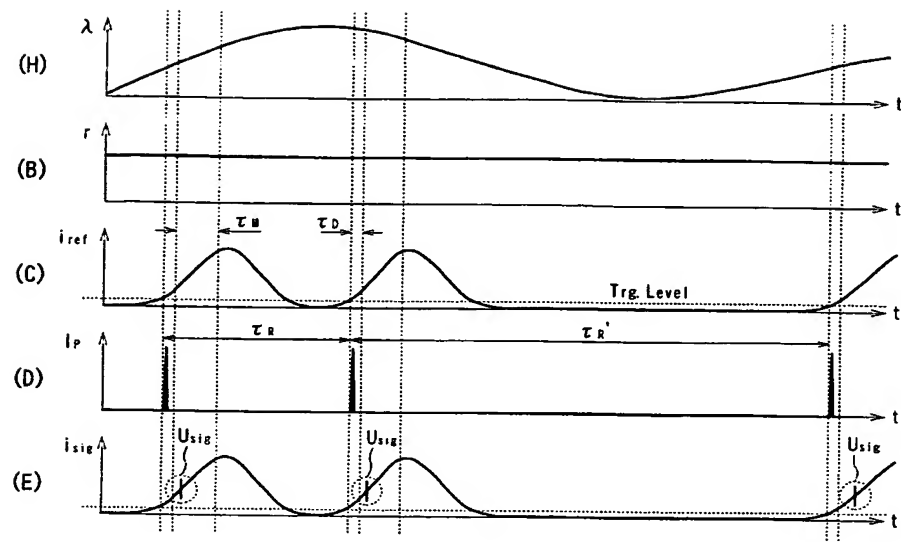
【図 27】



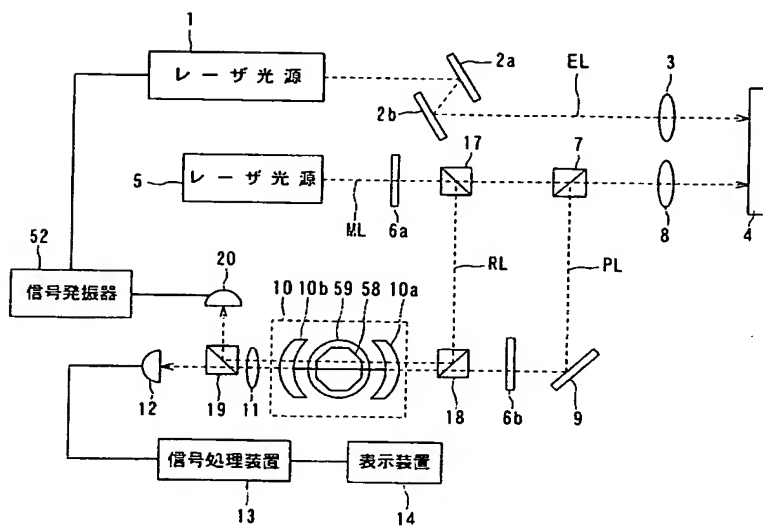
【図 28】



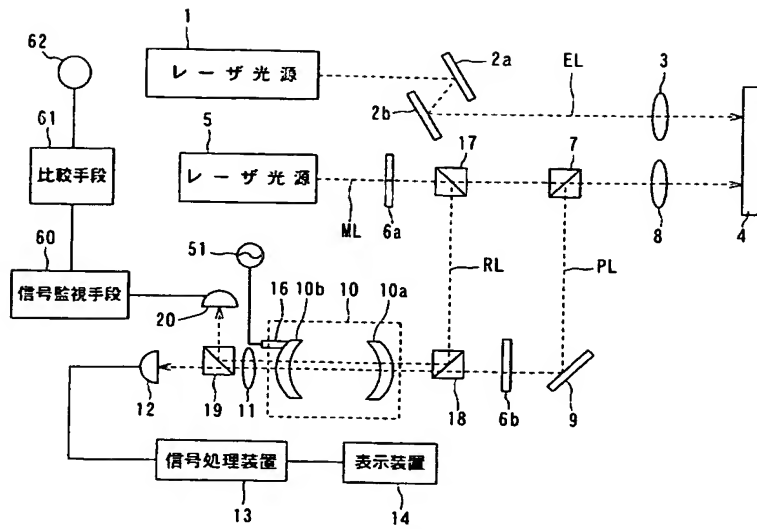
【図 29】



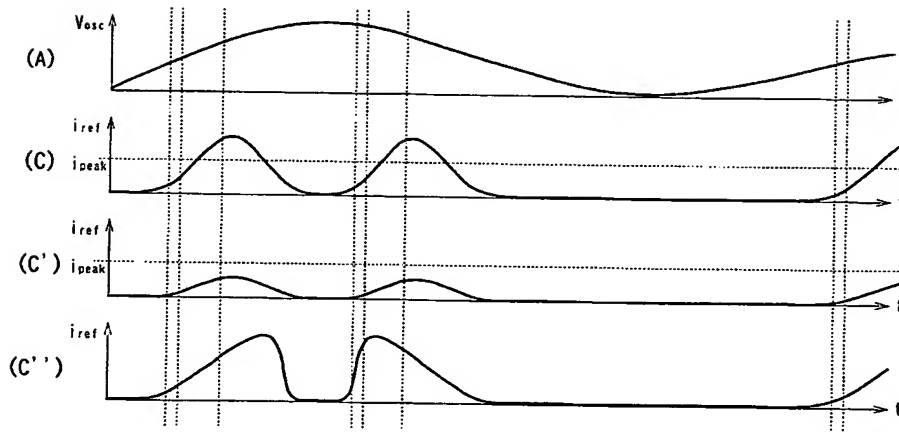
【図 30】



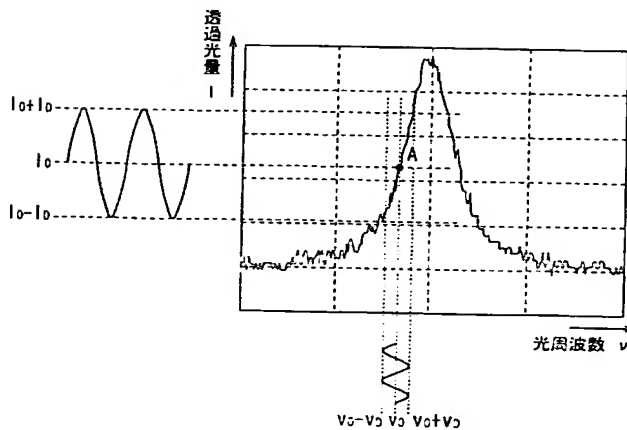
【図31】



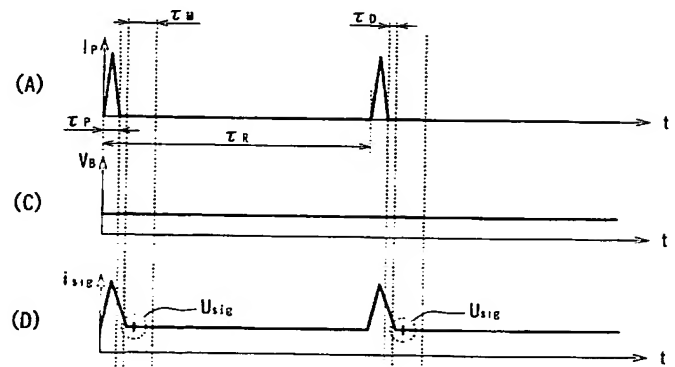
【図32】



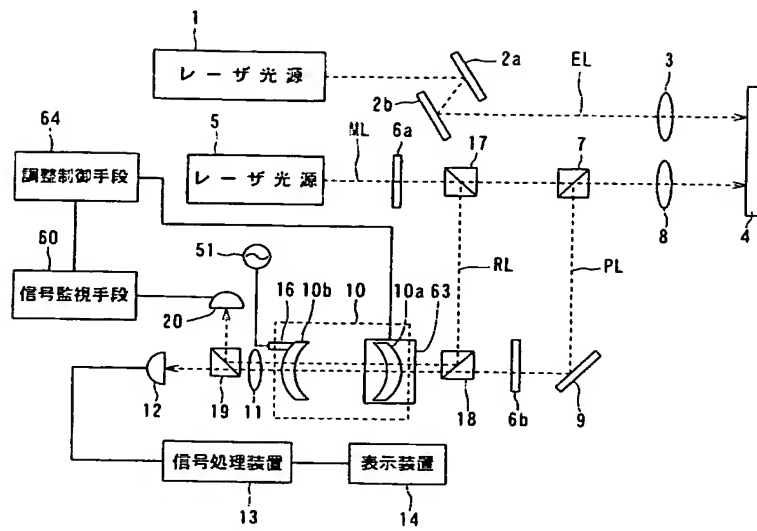
【図36】



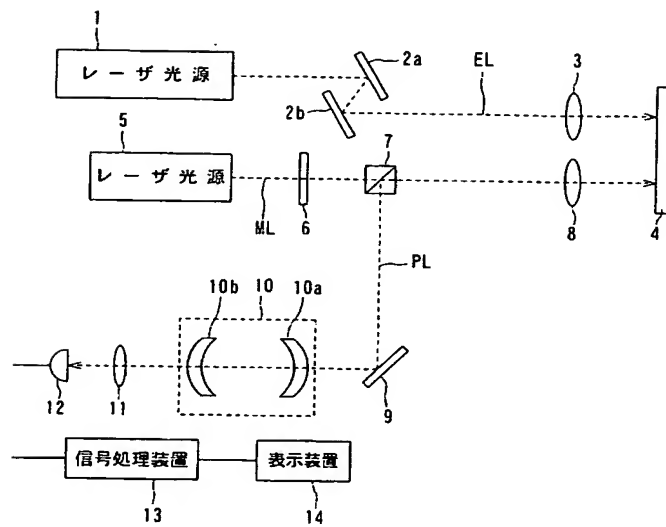
【図40】



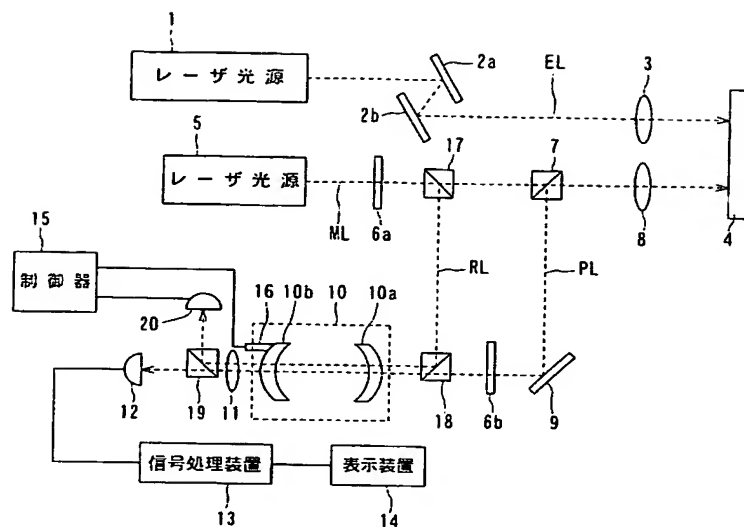
【図 3 3】



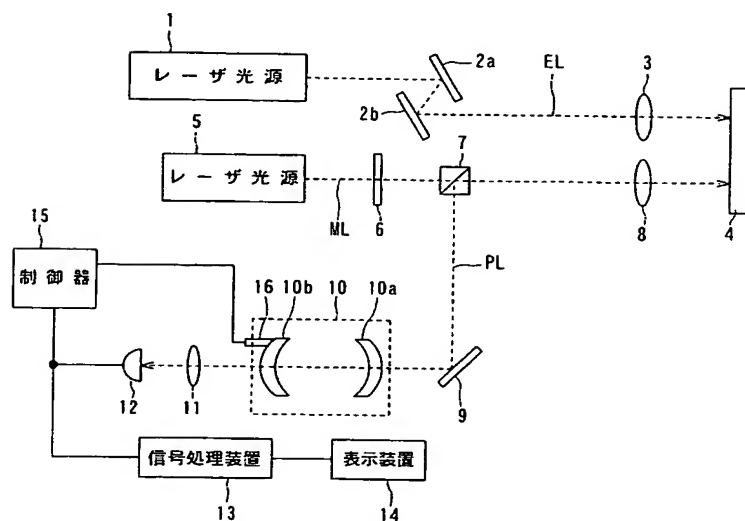
【図 3 4】



【図 37】



【図 38】



フロントページの続き

(72)発明者 向井 成彦  
神奈川県横浜市磯子区新杉田町 8 番地 株  
式会社東芝横浜事業所内  
(72)発明者 佐野 雄二  
神奈川県横浜市磯子区新杉田町 8 番地 株  
式会社東芝横浜事業所内

(72)発明者 兼本 茂  
神奈川県横浜市磯子区新杉田町 8 番地 株  
式会社東芝横浜事業所内  
(72)発明者 中野 英俊  
茨城県つくば市梅園一丁目 1-4 通商産  
業省工業技術院計量研究所内

F ターム(参考) 2G047 BC00 BC07 CA04 GD01  
5F072 AA01 AB01 KK06 KK15 KK30  
YY20